

SÉRIE A. 950
N° D'ORDRE 1776

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

G. FAILLA, E. E., M. A.

MEMORIAL HOSPITAL

NEW-YORK

1^{re} THESE : RECHERCHES SUR LA DISTRIBUTION DU RAYONNEMENT X PÉNÉTRANT DANS UN MILIEU DIFFUSANT.

APPLICATION AU DOSAGE EN RADIOTHÉRAPIE

2^e THESE : PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues, le 11 Décembre 1923, devant la Commission d'examen :

M^{me} P. CURIE, *Président.*

M. JEAN PERRIN }
M. DEBIERNE } *Examineurs*

LIBRAIRIE UNIVERSITAIRE

HENRI D'ARTHEZ

3, PLACE DE LA SORBONNE, 3

1923

SÉRIE A. 950
N° D'ORDRE 1776

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

G. FAILLA, E. E., M. A.

MEMORIAL HOSPITAL

NEW-YORK

1^{re} THESE : RECHERCHES SUR LA DISTRIBUTION DU RAYONNEMENT X PÉNÉTRANT DANS UN MILIEU DIFFUSANT.

APPLICATION AU DOSAGE EN RADIOTHÉRAPIE

2^e THESE : PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues, le 11 Décembre 1923, devant la Commission d'examen :

M ^{me} P. CURIE,	<i>Président.</i>
M. JEAN PERRIN	} <i>Examineurs</i>
M. DEBIERNE	

LIBRAIRIE UNIVERSITAIRE
HENRI D'ARTHEZ
3, PLACE DE LA SORBONNE, 3

1923

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM. |

Doyen. MOLLIARD, *Professeur.* Physiologie végétale.

Doyen honoraire. P. APPELL.

Professeurs honoraires. { P. PUISEUX.
VÉLAIN.
BOUSSINESQ.
PRUVOT.

EMILE PICARD Analyse supérieure et algèbre supérieure.
KOENIGS Mécanique physique et expérimentale.
GOURSAT Calcul différentiel et calcul intégral.
HALLER Chimie organique.
JOANNIS Chimie (Enseignement P. C. N.)
JANET Electrotechnique générale.
WALLERANT Minéralogie.
ANDOYER Astronomie.
PAINLEVÉ Mécanique analytique et mécanique céleste.
HAUG Géologie.
H. LE CHATELIER Chimie générale.
Gabriel BERTRAND Chimie biologique.
M^{me} P. CURIE Physique générale et radioactivité.
CAULLERY Zoologie (Evolution des êtres organisés).
C. CHABRIÉ Chimie appliquée.
G. URBAIN Chimie minérale.
Émile BOREL Calcul des probabilités et Physique mathém.
MARCHIS Aviation.
Jean PERRIN Chimie physique.
ABRAHAM Physique.
CARTAN Mécanique rationnelle.
Cl. GUICHARD Géométrie supérieure.
LAPICQUE Physiologie.
GENTIL Géographie physique.
VESSIOT Théorie des groupes et calcul des variations.
Professeurs. COTTON Physique générale.
DRACH Application de l'analyse à la géométrie.
C. FABRY Physique.
Charles PÉREZ Zoologie.
LÉON BERTRAND Géologie appliquée et géologie régionale.
LESPIEAU Théories chimiques.
LEDUC Physique théorique et physique céleste.
RABAUD Biologie expérimentale.
PORTIER Physiologie comparée.
DANGEARD Botanique.
MONTEL Mathématiques générales.
MAURAIN Physique du globe.
WINTREBERT Anatomie et physiologie comparées

HÉROUARD Zoologie.
Rémy PERRIER Zoologie (Enseignement P. C. N.)
SAGNAC Physique théorique et physique céleste
BLAJSE Chimie organique.
PÉCHARD Chimie (Enseignement P. C. N.)
AUGER Chimie analytique.
M. GUICHARD Chimie minérale.
GUILLET Physique.
JULIA Mathématiques générales.
MAUGUIN Minéralogie.
BLARINGHEM Botanique.
MICHEL-LÉVY Pétrographie.

Secrétaire Daniel TOMBECK



Après une absence de cinq ans, j'ai eu l'occasion de revenir en France et de faire un second séjour à l'Institut du Radium de l'Université de Paris. J'ai donc pu noter à quel point les travaux poursuivis dans les laboratoires de Physique et de Biologie de cet Institut avaient fait avancer la science de la radiothérapie, et ce m'est une agréable tâche d'en transcrire ici mon impression profonde.

Aussi est-ce pour moi un honneur dont je sens tout le prix que l'obtention du diplôme de l'Université de Paris, en présentant cette thèse dans laquelle j'apporte ma contribution modeste à la science de la radiologie.

Il est d'usage de remercier en pareille place les maîtres qui nous ont guidés. Je voudrais ici non point satisfaire seulement à une tradition, mais exprimer mes sentiments très sincères.

Que Madame CURIE veuille bien agréer l'hommage de ma respectueuse et vive gratitude pour l'aimable et bienveillant intérêt qu'elle m'a témoigné et pour les conseils éclairés qu'elle m'a prodigués.

Je n'oublierai jamais l'accueil si cordial que m'a réservé M. REGAUD au Pavillon Pasteur de l'Institut du Radium et aux Services thérapeutiques de la Fondation Curie, et les enseignements que j'ai retirés de son expérience.

Je tiens enfin à dire ici toute ma reconnaissance amicale à M. FERROUX qui voulut bien, malgré ses grandes occupations, revoir ma thèse et corriger les défaillances de style de mon manuscrit

PREMIÈRE THÈSE

Recherches sur la Distribution du
Rayonnement X Pénétrant
dans un Milieu Diffusant.

Application au Dosage en Radiothérapie.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES

Le problème général du dosage en radiothérapie comporte logiquement deux parties distinctes : 1°) la détermination de la qualité et de la quantité du rayonnement en chaque point du milieu irradié quelles que soient les conditions du traitement ; 2°) l'étude des effets biologiques produits. Il est peut-être superflu d'ajouter que les progrès de la radiothérapie dépendent de la juste corrélation des résultats des deux parties du problème. Nous ne nous occuperons dans ce travail que de la première partie, qui est simplement d'ordre physique.

Il est nécessaire d'abord d'expliquer les termes « qualité » et « quantité » du rayonnement. Un faisceau de rayons X est, en général, composé de radiations de longueurs d'onde très différentes les unes des autres, et dont la limite inférieure dépend exclusivement du voltage maximum employé. Les intensités *relatives* des composants de longueurs d'onde différentes, déterminent le comportement de l'ensemble. Faute d'une expression meilleure, on appelle cette caractéristique « la qualité » du rayonnement. On peut la comparer à « la couleur » de l'ensemble d'une lumière.

Il n'y a pas de manière précise de spécifier la qualité d'un faisceau de rayons X ou gamma parce que, actuellement, on ne dispose pas d'un procédé pour

déterminer l'intensité véritable de ses divers composants. La mesure du *flux* d'énergie du rayonnement ne se peut faire par des longueurs d'onde différentes parce que les résultats ne sont pas rigoureusement indépendants de la méthode employée. Puisque, en général, on ne connaît pas exactement la distribution de l'énergie en fonction des diverses longueurs d'onde, on ne peut prendre cette énergie comme mesure de la *quantité* de la radiation. D'ici résulte que le terme « quantité » implique toujours la propriété du rayonnement et la méthode qu'on a employées pour la déterminer.

Ordinairement on se sert, pour étudier les rayons X, de leur propriété ionisante. Les relations de qualité et de quantité du rayonnement qu'on obtient dans ces conditions se réfèrent seulement à la propriété d'ionisation et à la méthode expérimentale employée.

Il est vrai que pour la corrélation des doses et des effets biologiques produits par la radiation, peu importe quelle méthode on emploie pour mesurer les doses, pourvu qu'on les mesure toujours de la même manière. Mais il est plus avantageux d'employer une méthode qui donne des résultats ayant un parallélisme avec au moins un effet biologique défini, indépendamment de la longueur d'onde entre les limites du rayonnement employé en pratique.

Bien qu'on ne sache pas quelle méthode donne un parallélisme exact, les travaux expérimentaux des dernières années indiquent que les mesures ionométriques faites avec des chambres d'ionisation en matériaux organiques contenant de l'air comme

milieu ionisant, correspondent à certains effets biologiques, indépendamment de la qualité du rayonnement, entre des limites assez étendues. Pour cette raison, dans nos recherches, nous avons adopté ces conditions. Les résultats quantitatifs que nous donnons s'appliquent donc directement au dosage dans la radiothérapie.

Dans ce qui suit, le terme « qualité » se réfère au degré d'absorption du rayonnement par les tissus humains. Le terme « quantité » n'implique pas l'énergie du rayonnement, mais le pouvoir qu'il a d'ioniser l'air dans la chambre de notre appareil. Puisqu'on ne peut pas employer le terme « intensité » lorsqu'on mesure, avec une chambre d'ionisation, un rayonnement complexe dans un milieu diffusant, nous avons adopté l'expression « radiation effective ». Nous entendons par cela la quantité du rayonnement qui est effective dans la production des ions dans la chambre, pendant l'unité de temps.

A. — DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'appareil de mesure dont nous nous sommes servi dans nos expériences consiste en une petite chambre d'ionisation imitée de celle de *Friedrich*, reliée à un électroscope à feuille d'or au moyen d'un câble bien isolé. La chambre est en bakélite ; elle a 10 millimètres de diamètre, 15 millimètres de longueur et une paroi de 0,5 millimètre environ. Pour rendre conductrice la surface intérieure de la chambre, on l'a recouverte complètement d'encre de Chine. Comme électrode centrale, on a utilisé la mine de graphite d'un crayon ordinaire. L'électroscope est en laiton revêtu d'une épaisseur de plus d'un centimètre de plomb. Ses dimensions intérieures sont de $4 \times 4 \times 1,5$ centimètres.

Pour observer le déplacement de la feuille d'or, deux fenêtres ont été pratiquées dans les parois de l'électroscope. L'une a 5 mm. et l'autre 10 mm. de diamètre. Cette dernière porte une lentille aplanétique triple servant à projeter l'image de la feuille d'or sur un écran situé à 20 cm. de distance. Comme source de lumière, on emploie une lampe d'automobile à filament ramassé, placée derrière la petite fenêtre de l'électroscope. On peut, en ajustant la lentille dans sa monture, obtenir une image nette de la feuille sur l'écran.

L'intervalle dans lequel on observe la chute de la feuille est repéré sur l'écran ; on peut le faire petit ou grand, selon la rapidité des mouvements de la feuille.

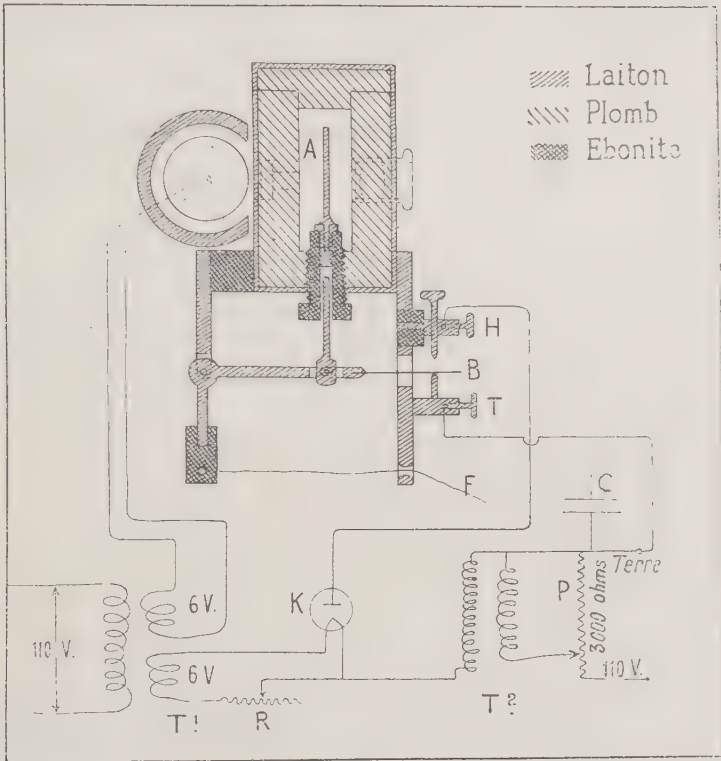
Le câble qui relie la chambre d'ionisation à l'électroscope consiste en un fil d'acier très mince engainé de caoutchouc de 1 cm. d'épaisseur environ. L'ensemble est recouvert d'une enveloppe en fil d'aluminium que l'on relie à la terre pour assurer la protection électrostatique.

La chambre d'ionisation est reliée au câble par une pièce d'ébonite de 10 cm. de long de forme conique ; le contact électrique est établi à l'aide d'un fil d'aluminium traversant le cône d'ébonite suivant son axe. De cette manière, il n'y a pas de métal dans le voisinage de la chambre autre que ce fil d'aluminium.

Pour charger l'électroscope, nous nous servons depuis plusieurs années d'un dispositif électro-dynamique extrêmement commode. Il se compose d'un petit transformateur permettant de porter le voltage du réseau qui alimente le laboratoire (110 volts) à la valeur nécessaire pour charger l'électroscope (400 volts environ). Le courant transformé est rectifié par un petit kénotron et stabilisé par un condensateur. Le schéma de la figure 1 reproduit le montage électrique de notre dispositif.

Le transformateur T a deux enroulements secondaires séparés : l'un sert au chauffage du kénotron et l'autre alimente la lampe de l'électroscope. La tension pulsatoire produite par l'ensemble trans-

Fig. 1



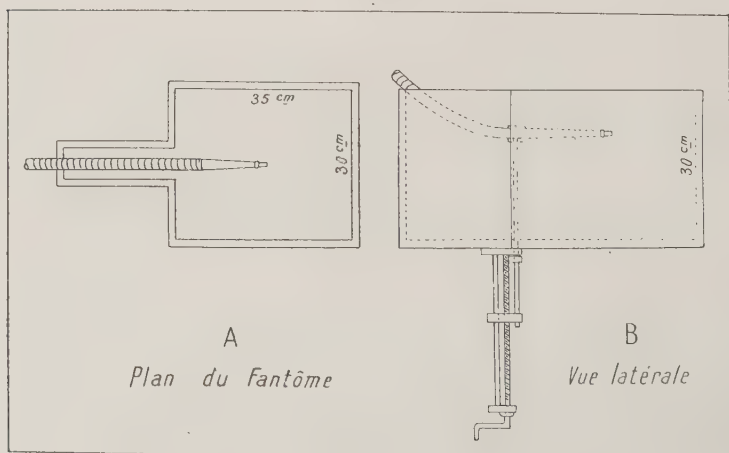
Section de l'Électroscope et Schéma du Dispositif de Charge

formateur T² et kénotron K est stabilisé par le condensateur C et l'on obtient ainsi à la borne H une tension sensiblement constante. Si l'on tire alors sur le fil F on établit le contact entre la borne H et la tige A qui porte la feuille d'or. En relâchant le fil F, le contact avec la tige A se rompt avant que le ressort B n'ait touché la borne de terre. La feuille d'or reste ainsi chargée.

Le réglage précis de la tension de charge permettant d'obtenir la divergence de la feuille à la position désirée, se fait à l'aide du potentiomètre P, qui permet un réglage très fin : il est nécessaire en effet, comme on le sait, de toujours charger la feuille au même potentiel, pour faire de bonnes mesures ionométriques.

Pour faciliter la manipulation, le potentiomètre P est placé auprès de l'écran. En pratique, à cause de l'imperfection des isolants de l'appareil on peut aussi régler le voltage en faisant varier la température du filament du kénotron au moyen du rhéostat R.

Fig. 2



Le fantôme consiste en une cuve de fer galvanisé revêtue intérieurement d'une épaisseur de bois de 2 centimètres. Ses dimensions sont :

longueur : 35 cm.

largeur : 30 cm.

profondeur : 30 cm.

La chambre d'ionisation est maintenue dans la position horizontale, mais elle peut être abaissée ou haussée dans le fantôme au moyen d'une vis graduée en millimètres (voir fig. 2 B). Le câble qui aboutit à la chambre d'ionisation étant flexible, il est plus commode de le faire pénétrer dans le fantôme par la surface libre de l'eau que de construire une porte latérale coulissante imperméable. Dans ce but, un réservoir supplémentaire a été adjoint au fantôme sur un de ses côtés et communique largement avec lui. C'est par ce réservoir que le câble pénètre dans le fantôme. Le déplacement de la surface libre de l'eau à mesure qu'une portion plus grande du câble est immergée, est tout à fait négligeable.

Fig. 3



Vue générale de l'Appareil de Mesures

La fig. 3 reproduit l'ensemble du fantôme, de la chambre d'ionisation, de l'électroscope et du câble de connexion.

Pendant les mesures, l'électroscope est placé aussi loin que possible du fantôme, devant une fenêtre en verre plombeux pratiquée dans la paroi de la chambre où est disposé l'appareillage. L'expérimentateur se tient derrière cette fenêtre; il peut ainsi observer sans danger les déplacements de l'image de la feuille d'or sur l'écran. Pour charger l'électroscope du dehors, il est nécessaire seulement de faire passer le fil de coton à travers un petit orifice pratiqué dans la paroi plombée de la salle.

L'appareil de rayons X dont nous nous sommes servi est de la Maison Waite et Bartlett de New-York. Il se compose de deux transformateurs à circuit magnétique fermé, montés en série et capables de fournir dans ces conditions une tension max. de 280.000 volts, et d'un commutateur tournant de Snook

L'ampoule Coolidge est placée dans une caisse revêtue de plusieurs millimètres de plomb. Les connexions haute tension sont assurées par des tubes afin d'éviter autant que possible l'effet corona. Deux milliampèremètres sont montés en série avec le tube dans la caisse plombée, afin d'être certain que l'on mesure seulement le courant qui traverse l'ampoule. La cabine de commande, revêtue de plomb, est disposée dans un coin de la salle. Des petites fenêtres en verre plombeux permettent d'observer les milliampèremètres et l'électroscope pendant le fonctionnement de l'appareil.

Pour mesurer le voltage appliqué à l'ampoule à rayons X, nous nous sommes servi d'un spintermètre à sphères de 125 millimètres de diamètre construit sur les données des « Standardisation Rules of the American Institute of Electrical Engineers ».

On sait que, tout spintermètre monté en dérivation sur un tube à rayons X, indique la valeur instantanée maxima du voltage utilisé pour alimenter le tube. Or, dans un appareil à commutateur tournant, il se produit constamment des oscillations accidentelles de haute fréquence dont la tension est parfois supérieure à la tension normale du transformateur. Si donc au moment où l'on fait une mesure avec le spintermètre, une des oscillations se produit, le voltage déduit de la distance explosive mesurée n'est pas celui qui existe normalement aux bornes de l'ampoule ; il peut être beaucoup plus élevé que celui-ci. Il est donc nécessaire d'abord d'éviter autant que possible les oscillations de haute fréquence, puis de répéter un certain nombre de fois les mesures que l'on effectue au spintermètre, et cela pour chaque position particulière du rhéostat de réglage des transformateurs et pour un même courant de chauffage du filament de la Coolidge. On rejette les valeurs trop élevées, et la moyenne des autres donne avec une assez grande précision la valeur de la tension maxima correspondant aux conditions de fonctionnement choisies.

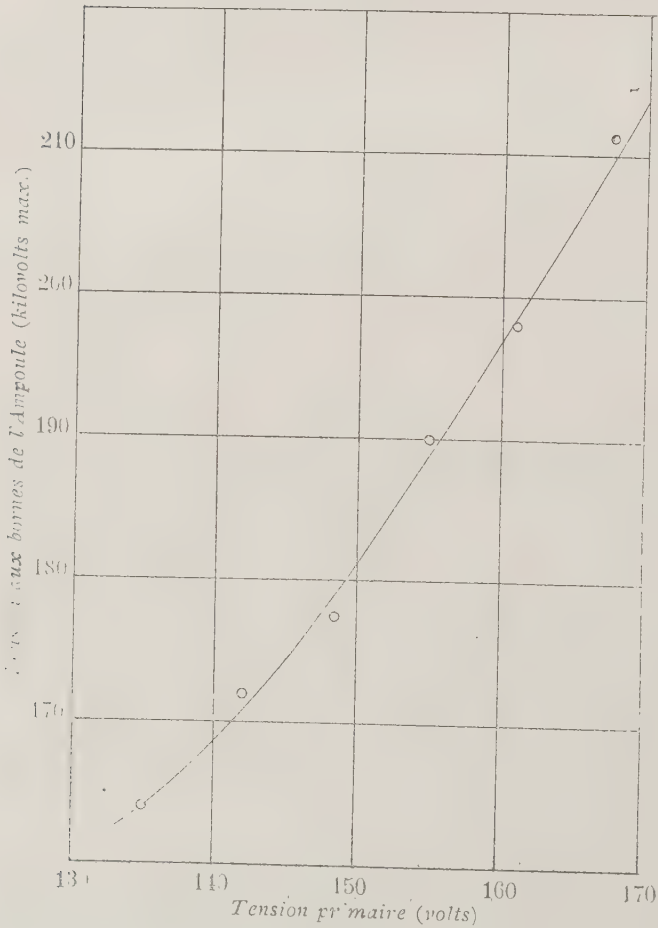
Indiquons tout d'abord que nous nous sommes fixé, pour toutes nos mesures ionométriques, un courant cathodique constant (4 milliampères) et un voltage

aux bornes de l'ampoule, constant lui aussi (200 kilovolts max.).

Pour appliquer à l'ampoule le voltage désiré, nous avons procédé de la manière suivante :

Le courant qui traverse l'ampoule étant constam-

Efig. 4



Courbe d'Étalonnage du Voltmètre Primaire

ment maintenu à 4 milliampères, nous avons déterminé avec le spintermètre à sphères la distance explosive et, par suite, le voltage secondaire correspondant à chaque position particulière de la manette de commande du rhéostat de réglage. Au moment précis où l'étincelle éclatait, on notait l'indication du voltmètre placé en dérivation sur le primaire du transformateur. Nous avons ainsi fait correspondre, pour un débit constant de 4 milliampères à travers l'ampoule, à chaque valeur de la tension aux bornes de l'ampoule une valeur du voltage appliqué au primaire du transformateur. Le résultat de ces mesures préliminaires est traduit par le graphique de la figure 4. Ce graphique montre que, pour obtenir, sous une intensité de 4 milliampères, une tension aux bornes de l'ampoule de 200 KV., il faut appliquer au primaire du transformateur *de notre appareillage* une tension de 162 volts.

On obtient par ce procédé la tension secondaire désirée avec beaucoup plus de précision que si on la réglait au moyen du spintermètre dans le cours des expériences. On peut par le même procédé réaliser un voltage secondaire quelconque (dans les limites de la courbe, bien entendu), pourvu que le courant qui traverse l'ampoule soit constamment maintenu à 4 milliampères.

Dans les transformateurs à circuit magnétique fermé, le rapport entre la tension secondaire (à l'ampoule) et la tension primaire se maintient très constant ; il n'est pas nécessaire de faire tous les jours un nouvel étalonnage du voltmètre primaire. Il est bon

cependant de déterminer fréquemment, par la technique indiquée plus haut, un ou deux points de la courbe, dans le but de s'assurer qu'il n'y a pas eu de variation notable.

Si le réglage de la tension primaire se fait avec un auto-transformateur, une petite variation du courant qui traverse l'ampoule n'entraîne pas une variation appréciable de la tension secondaire. Mais s'il y a un rhéostat dans le circuit primaire, le voltage secondaire peut, pour une même valeur de la tension appliquée au primaire, varier assez considérablement avec l'intensité du courant qui traverse l'ampoule. Dans ce cas, il est très important de maintenir au secondaire une intensité de courant rigoureusement égal à celle pour laquelle on a établi la courbe d'éta-lonnage.

Dans toutes nos mesures, le courant secondaire a été maintenu à 4 milliampères et la tension aux bornes de l'ampoule à 200 KV. max. Nous nous sommes assurés, en plus, que pour de mêmes conditions expérimentales le courant d'ionisation restait sensiblement constant d'un jour à l'autre.

B. — PRECAUTIONS PREALABLES CONCERNANT L'APPAREIL DE MESURES ET SON REGLAGE

I. — *Obtention du courant de saturation dans l'électroscope.*

Dans un dispositif de mesures d'ionisation, dont l'instrument de mesures est un électroscope à feuille d'or, il n'est pas très commode de faire l'essai de saturation. Mais si l'on dispose d'une quantité suffisante d'émanation, l'épreuve devient très facile. Nous avons pris des tubes d'émanation de mêmes dimensions mais de teneurs (en millicuries) très différentes. Plaçant successivement chaque tube à une distance convenable de la chambre d'ionisation et la même pour tous les tubes, on peut obtenir des temps de chute de la feuille comparables à ceux des mesures faites avec les rayons X. Si les courants d'ionisation ainsi produits sont proportionnels aux valeurs des tubes (en millicuries) on peut être sûr que le voltage de charge de l'électroscope est suffisant pour avoir la saturation. Nous avons fait cela avec des tubes qui nous donnaient les uns des courants très faibles, les autres des courants notablement plus forts que ceux que l'on obtient avec les rayons X ; nous avons toujours trouvé une proportionnalité exacte.

II. — *Fuite spontanée de l'électroscope.*

Elle est restée à peu près constante pendant 18 mois. Etant donné que les erreurs provenant des variations de la fuite spontanée de l'appareil sont d'autant plus importantes que les mesures sont plus longues, nous avons toujours dans nos expériences déterminé cette fuite après les mesures longues. Mais en outre, on la déterminait systématiquement deux ou plusieurs fois chaque jour et l'on faisait la correction nécessaire pour toutes les mesures.

III. — *Effets dus à l'irradiation de l'électroscope et du câble.*

L'ionisation de l'air de l'électroscope était complètement négligeable pour plusieurs raisons.

a) L'ampoule Coolidge était enfermée dans une caisse revêtue de plomb et les radiations directes envoyées sur le fantôme n'arrivaient pas à l'électroscope.

b) L'électroscope était placé loin de l'ampoule et du fantôme.

c) Les parois de l'électroscope étaient doublées de plus de un centimètre de plomb ; ses deux fenêtres étaient très petites et le volume d'air contenu dans l'électroscope très faible aussi ($4 \times 4 \times 1,5$ cm³).

Pour déterminer l'effet correspondant à l'irradiation du câble, nous avons exposé celui-ci au rayonnement direct, tandis que la chambre d'ionisation était en dehors du champ et entourée de plomb. Dans ces conditions, nous avons trouvé que la décharge

de l'électroscope était accélérée ; mais dans nos expériences la fuite due au câble était négligeable.

IV. — *Phénomène de pénétration des charges dans les isolants.*

Ce phénomène se produit toujours dans les mesures électroscopiques mais il est très difficile d'en déterminer l'importance. Des expériences particulières que nous avons faites nous ont montré que, pour des temps de chute, variant dans le rapport de 1 à 4, le phénomène restait à peu près le même. Dans toutes nos mesures, nous avons amené la feuille d'or de l'électroscope toujours à la même divergence, et nous avons procédé, dans chaque cas, par séries de déterminations, ne nous arrêtant que lorsque plusieurs déterminations consécutives nous donnaient presque le même résultat.

V. — *Modification de la quantité de radiations diffusées arrivant dans la chambre d'ionisation, du fait de la présence du câble.*

On voit, d'après la description que nous avons déjà faite de la chambre d'ionisation et du câble de connexion, qu'il n'y a pas à leur voisinage de métal susceptible d'arrêter le rayonnement diffusé parcourant l'eau dans une direction sensiblement parallèle au câble. Néanmoins la tige d'ébonite qui relie la chambre d'ionisation au câble à grand isolement, ayant une composition chimique et une densité différente de celle de l'eau, doit introduire des perturbations dans

la distribution du rayonnement secondaire. Pour nous faire une idée de la modification introduite par la présence de l'extrémité proximale du câble, nous avons fait des mesures comparatives, en prolongeant, du côté opposé du câble, la chambre d'ionisation par une seconde tige d'ébonite identique à la première.

Nous avons constaté ainsi une diminution de l'ionisation dans la chambre. L'effet n'était pas perceptible quand la chambre se trouvait à la surface de l'eau, mais à une profondeur de 10 centimètres l'adjonction de la deuxième tige d'ébonite diminuait l'ionisation de 4 % environ. On peut donc conclure de cela que dans l'emploi normal de l'appareil les mesures d'ionisation faites à 10 centimètres de profondeur sont de 4 % plus petites qu'elles ne le seraient s'il n'y avait pas de tige d'ébonite d'un côté de la chambre. Nous avons fait la correction correspondante à toutes les mesures effectuées dans la profondeur de l'eau.

RESULTATS DES EXPERIENCES

I. — VARIATION DE LA QUANTITE DE RADIATION EFFECTIVE A UNE PROFONDEUR DONNEE EN FONCTION DE LA GRANDEUR DU CHAMP

TABLEAU I

Influence de la grandeur du **champ** sur la radiation effective à la **surface**.

DISTANCE F-P: 73,5 cm.						
CHAMBRE D'IONISATION A MOITIE IMMERGEE						
CHAMP CM ²	FILTRE EN MILLIMETRES					MOYENNE (RAYON FILTRE)
	0	3,27 Al	0,42 Cu	0,84 Cu	1,26 Cu	
1000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
237	95,2	92,3	92,6	92,0	90,6	91,9
118	90,9	86,5	86,8	87,0	86,2	86,6
41,5	84,0	79,4	79,0	78,8	78,7	79,0

Les chiffres du tableau I montrent que :

1° plus le champ est petit plus la *radiation effective* à chaque profondeur est faible.

2° la variation de la radiation effective avec la grandeur du champ est sensiblement la même pour les quatre filtres employés.

3° une diminution de l'aire du champ de 1000 à 41,5 cm², réduit la radiation de 21 %.

4° L'effet est moins marqué pour les rayons non filtrés.

Ces expériences répétées pour des distances focus-peau (F - P) de 52,7 et 60,6 cm. (toutes autres conditions restant les mêmes) ont conduit à des résultats identiques.

TABLEAU II

Influence de la grandeur du **champ** sur la radiation effective à la **profondeur de 5 cm.**

DISTANCE F-P. 52,7 CM						
CHAMP CM ²	FILTRE EN MILLIMETRES					MOYENNE
	3,27 Al	0,42 Cu	0,84 Cu	1,26 Cu	1,68 Cu	(Cu)
1000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
230	82,3	82,0	81,0	81,5	81,8	81,8
121	70,0	68,6	68,7	68,5	68,5	68,6
37,8	48,1	49,4	49,6	48,9	49,3	49,3

Les chiffres du tableau II montrent que :

1° plus le champ est petit plus la radiation effective à 5 cm. de profondeur est faible.

2° — la variation de la radiation effective avec la grandeur du champ est sensiblement la même pour les cinq filtres employés.

3° — une diminution de l'aire du champ de 1000 à 37,8 cm² réduit la radiation de 40 %.

Dans ce cas aussi, des séries d'expériences répétées en ne changeant que la distance focus-peau (portée à 73,5 cm) nous ont conduits aux mêmes résultats.

TABLEAU III

Influence de la grandeur du **champ** sur la radiation effective à la **profondeur de 10 cm.**

DISTANCE F-P: 52,7 cm						
CHAMP cm ²	FILTRE EN MILLIMETRES					MOYENNE (Cu)
	3,27 Al	0,42 Cu	0,84 Cu	1,26 Cu	1,68 Cu	
1000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
230	87,0	88,0	87,8	87,7	87,8	87,8
121	76,2	78,0	77,7	77,5	77,4	77,6
37,8	59,0	60,0	59,8	59,8	60,0	59,9

Les chiffres de ce tableau nous conduisent aux mêmes conclusions générales que ci-dessus. Nous pouvons donc formuler le premier énoncé général suivant :

1^{re} — *La variation en fonction de la grandeur du champ de la radiation effective à une profondeur donnée quelconque, est la même pour tous les filtres et pour toutes les distances focus-peau employées en pratique.*

est bon de rappeler ici les conditions expérimentales limites entre lesquels on s'est tenu dans nos expériences, ce sont :

Voltage secondaire : 200 KV. max. dans toutes les expériences.

Distance focus-peau : 52,7 à 73,5 cm.

Filtre de 0,42 à 1,68 mm. de cuivre et 3,27 mm. d'aluminium.

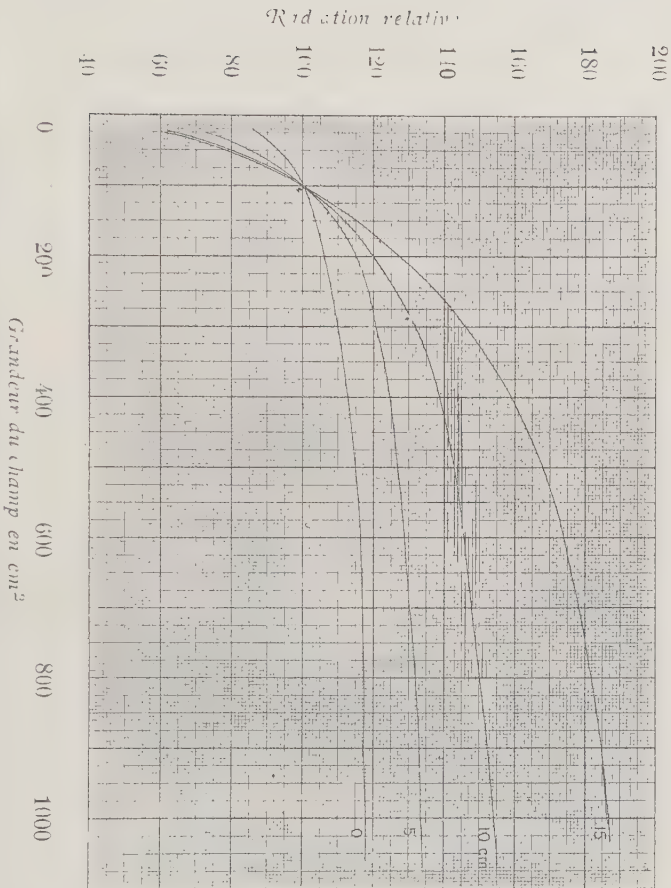
Champ de 40 à 1000 cm². (de forme rectangulaire, avec des côtés dans le rapport de 7 à 10).

Epaisseur d'eau : 0 à 10 cm dans un fantôme dont le volume était de $30 \times 30 \times 35$ cm³.

Nous avons fait, en outre, plusieurs expériences supplémentaires dans lesquelles nous avons réduit l'aire du champ jusqu'à 20 cm² et augmenté l'épaisseur d'eau jusqu'à 15 cm. Nous avons pu en déduire que, entre ces limites nouvelles, l'énoncé général ci-dessus s'applique avec une bonne précision. Si l'on dépasse légèrement ces limites, on ne commet pas de grosses erreurs.

Les résultats des expériences que nous avons décrites jusqu'ici sont rassemblés dans le graphique de la figure 5 : sur ce graphique nous avons choisi arbitrairement la valeur de la radiation effective correspondant à un champ de 100 cm² et l'avons fixée à 100 %, pour toutes les profondeurs. Selon l'énoncé général N° I, les résultats traduits par les courbes de la figure 5 sont indépendants de la distance focus-peau et du filtre, dans les limites que l'on ne dépasse pas habituellement. En conséquence, le champ d'utilisation pratique de ces courbes est très grand.

Fig. 5



Courbes de variation de la radiation effective en fonction du facteur champ

§ 2° VARIATION DE LA QUANTITE DE RADIATION
EFFECTIVE A UNE PROFONDEUR DONNEE
EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DU
FILTRE DE CUIVRE

TABLEAU IV

Influence de la **filtration** sur la radiation
effective à la **surface**

DISTANCE F-P: 73,5 CM					
CHAMBRE D'IONISATION A MOIETE IMMERGEE					
FILTRE MM. Cu	CHAMP EN CM ²				PROFOND.
	41,5	118	237	1000	
0	412,0	405,0	397,0	387,0	4000
0,42	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,94	64,7	64,8	64,0	64,5	64,5
1,26	48,2	47,8	47,0	48,2	47,8

Les chiffres du tableau IV montrent que l'influence de la filtration sur la radiation effective à la surface est sensiblement la même pour les champs dont l'aire est comprise entre 11,5 et 1000 cm², quand la distance focus-peau est de 73,5 cm. Il n'y a un désaccord marqué que dans le cas des rayons non filtrés ; mais il faut remarquer que, en pratique radiothérapique, avec un voltage de 200 KV on emploie toujours une filtration importante.

Les mêmes expériences répétées avec une distance focus-peau de 52,7 cm. et aussi un filtre de 1,68 mm. de cuivre ont donné les mêmes résultats. D'ailleurs, les pourcentages trouvés par les divers couples de filtre et de champ ont été les mêmes que pour les expériences effectuées à la distance de 73,5 cm.

Par conséquent, nous pouvons conclure que, entre les limites indiquées, l'influence de la filtration sur la radiation effective à la surface est indépendante de la grandeur du champ et de la distance focus-peau.

TABLEAU V

Influence de la **filtration** sur la radiation effective
à la **profondeur de 5 cm**

DISTANCE F-P: 52,7 cm					
FILTRE mm Cu	CHAMP EN CM ²				MOYENNE
	37,8	121	230	100	
0	276,0	297,0	261,0	284,0	288,0
0,42	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,84	66,7	66,7	66,7	66,7	66,7
1,26	49,7	49,7	49,8	51,2	49,8
1,68	38,3	39,2	38,5	39,3	38,9

Les tableaux V et VI renferment les résultats des expériences effectuées avec une même distance focus-peau de 52,7 cm. la chambre d'ionisation étant à 5 cm. de profondeur dans le premier cas ; à 10 cm dans le second. Ils montrent que, soit à 5, soit à 10 cm. de profondeur, l'influence de la filtration sur

la radiation effective est, comme à la surface, indépendante de la grandeur du champ.

TABLEAU VI

Influence de la **filtration** sur la radiation effective
à la **profondeur de 10 cm**

DISTANCE F-P: 52,7 cm					
FILTRE mm Cu	CHAMP EN CM ²				MOYENNE
	37,8	121	230	1000	
0	176,0	180,0	176,0	186,0	180,0
0,42	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,84	68,4	70,2	69,5	70,2	69,7
1,26	51,8	53,2	53,2	53,3	53,2
1,68	42,3	43,2	41,8	42,8	42,5

Des expériences analogues faites avec une distance focus-peau de 73,5 cm. successivement avec 3 filtres de cuivre (0,42 — 0,84 — et 1,26 mm.) et 4 champs d'irradiation différents (41,5 — 118 — 237 et 1000 cm²) nous conduisent aux mêmes conclusions. Les moyennes des résultats trouvés pour les 4 champs employés sont données dans le tableau VII. Si l'on compare les pourcentages trouvés pour chaque profondeur (5 ou 10 cm.) dans le cas des expériences faites à la distance focus-peau de 73,5 cm, avec les pourcentages moyens correspondants trouvés lorsque la distance focus-peau est de 52,7 cm. on voit que la concordance n'est pas très bonne. Le désaccord maximum se produit pour les pourcentages

TABLEAU VII

DISTANCE F-P: 73,5 cm		
FILTRE mm Cu	PROFONDEUR	
	5 cm.	10 cm.
	VALEURS	MOYENNES
0,42	100,0	100,0
0,84	67,4	71,4
1,26	49,5	54,9

correspondants à un filtre de 1,26 mm. de cuivre et la discordance n'est que de :

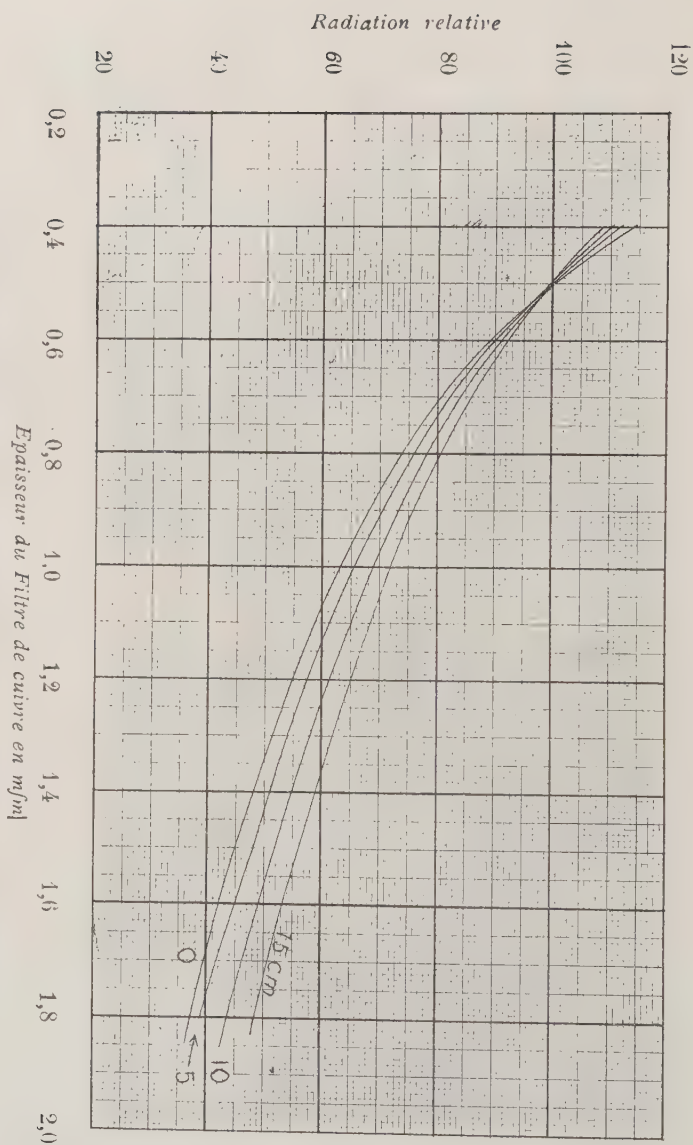
$$\frac{54,9 - 53,2}{53,2} = 3 \%$$

Si l'on tient compte de ce que le courant d'ionisation dans la petite chambre que nous avons employée est particulièrement faible pour ces dernières conditions expérimentales, on voit que cette divergence est de l'ordre de grandeur des erreurs inhérentes aux expériences de ce genre.

Considérant que, pour les applications pratiques de ce travail, une erreur de 3 % est tout à fait tolérable, nous sommes autorisés à formuler le nouvel énoncé général pratique suivant :

II. — *La variation en fonction du facteur filtre de la radiation effective à une profondeur donnée est la même pour tous les champs et pour toutes les distances focus-peau employés dans la pratique Rontgenthérapique actuelle.*

Fig. 6



Courbes de variation de la radiation effective en fonction du facteur filtre

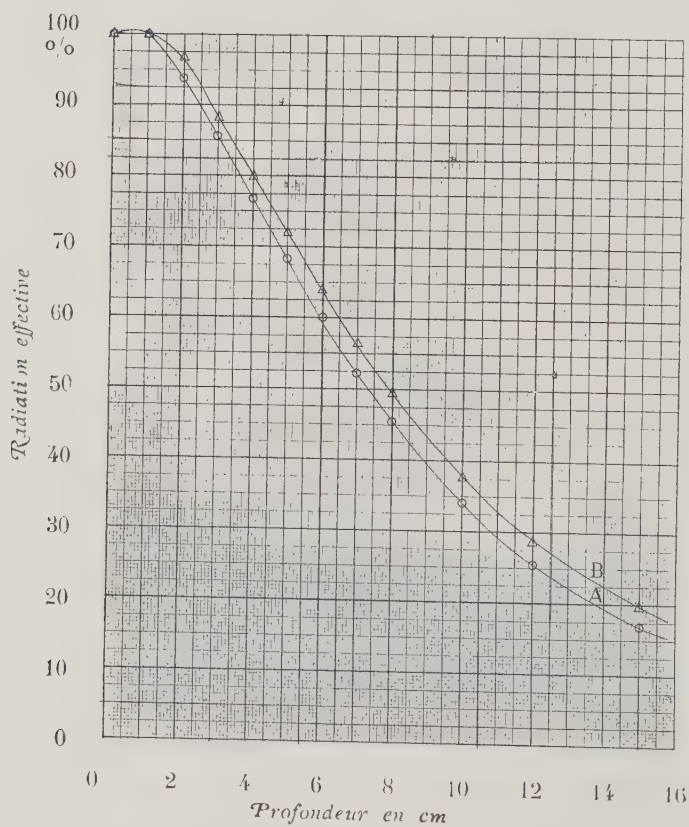
Les mêmes restrictions sont à faire pour cet énoncé général, que pour notre première généralisation. Nous avons fait, dans ce cas aussi, des expériences complémentaires, en portant la profondeur dans l'eau jusqu'à 15 centimètres. Une représentation graphique des résultats obtenus est donnée dans la figure 6. Nous avons choisi arbitrairement, comme étant égale à 100 % de la radiation effective à chaque profondeur dans l'eau, celle qui correspond à un filtre de 0,5 mm. de cuivre et cela parce que cette épaisseur de cuivre (ou de zinc) est une des plus couramment employée en radiothérapie profonde.

Comme, en vertu de notre énoncé général N° II l'influence du filtre sur la radiation effective à une profondeur donnée est indépendante de la distance focus-peau et de l'aire du champ, les courbes que nous donnons sont d'une application pratique assez générale.

Nous pouvons résumer les résultats acquis jusqu'ici en disant que les variations de la radiation effective à une profondeur donnée quelconque dans l'eau, en fonction soit de l'étendue du champ, soit de l'épaisseur du filtre, sont indépendantes entre-elles, et que toutes deux sont indépendantes de la distance focus-peau.

§ 3° — VARIATION EN FONCTION DE LA DISTANCE
FOCUS-PEAU DE LA RADIATION EFFECTIVE
A UNE PROFONDEUR DONNEE

Fig. 7



Courbe de Distribution du Rayonnement en Profondeur

Champ 120: cm², Filtre : 0,42 m/m de cuivre

A — distance F - P : 52,7 cm.

B — — — : 73,5 cm.

Les courbes de la figure 7 ont été obtenues en mesurant avec notre petite chambre d'ionisation la radiation effective dans l'eau à diverses profondeurs comprises entre 0 et 15 centimètres.

Pour la courbe A la distance focus-peau a été de 52,7 cm. et pour la courbe B de 73,5. Dans les 2 cas, le voltage maximum était de 200 KV, le filtre 0,42 mm. de cuivre et le champ 120 cm². La seule différence était donc dans la distance focus-peau. Par conséquent les différences des valeurs trouvées pour la radiation effective, à profondeur égale, ne peuvent être imputées qu'au changement de distance focus-peau.

S'il n'y avait pas d'eau dans le fantôme (et si le champ était illimité — voir § 4) on pourrait calculer l'intensité du rayonnement correspondant à chaque point des courbes de la figure 7 au moyen de la formule :

$$R = \frac{x^2}{(x+z)^2}$$

dans laquelle : x = distance focus-peau,

z = profondeur à partir de la surface libre de l'eau (fictive puisqu'il n'y a pas d'eau).

En prenant $x = 52,7$ et faisant varier z de 0 à 15, on obtient les chiffres de la colonne C du tableau VIII. De la même manière, en prenant $x = 73,5$, on obtient les chiffres de la colonne F du même tableau.

TABLEAU VIII

A	B	C	D	E	F	G
CHAMP : 120 cm ² FILTRE : 0,42 mm.Cu						
PROFON DEUR CM.	DISTANCE F-P: 52,7cm			DISTANCE F-P: 73,5cm		
	EXPLER.	$\frac{100 X^2}{(X+Z)^2}$	RAPPORT B:C	EXPLER.	$\frac{100 X^2}{(X+Z)^2}$	RAPPORT E:F
0	100,0	100,0	1,000	100,0	100,0	1,000
1	100,0	96,3	1,038	100,0	97,2	1,029
2	93,8	92,8	1,010	96,8	94,8	1,021
3	85,7	89,5	0,958	88,3	92,3	0,959
4	76,7	86,4	0,888	80,0	89,8	0,890
5	68,1	83,4	0,818	72,0	87,6	0,822
6	60,0	80,7	0,744	63,9	85,5	0,746
7	52,3	77,9	0,671	56,5	83,3	0,678
8	45,5	75,4	0,603	49,5	81,3	0,610
10	34,2	70,7	0,484	37,9	77,4	0,490
12	25,5	66,3	0,385	28,6	73,8	0,391
15	17,0	60,6	0,281	19,7	68,9	0,286

L'introduction d'eau dans le fantôme, l'emploi de diaphragmes donnant des champs égaux modifient ces pourcentages. Mais, en vertu de nos deux énoncés généraux précédents, un même rapport devrait exister entre les pourcentages correspondants à une même profondeur ; c'est-à-dire que si, pour une distance focus-peau de 52,7 cm la radiation effective à la profondeur Zn est P % de l'intensité fictive déduite de la formule ci-dessus, la radiation effective à la même profondeur, mais pour une dis-

tance focus-peau de 73,5 cm devrait être également $P\%$ de l'intensité fictive correspondant à $x = 73,5$ et $z = Z_n$.

Pour vérifier si cette prévision est exacte, nous avons mis dans le tableau VIII les pourcentages expérimentaux à côté des pourcentages calculés par la formule ci-dessus, et nous avons déterminé aussi les rapports entre ces couples de pourcentages. La comparaison des deux rapports (colonne D et colonne G) nous montre qu'ils sont à peu près les mêmes. Le désaccord le plus marqué se trouve entre les chiffres correspondants à une profondeur de 15 cm. et il est dans ce cas même inférieur à 2 %.

Dessauer, qui a fait des expériences analogues aux nôtres, mais avec une méthode photographique, arrive lui aussi à une conclusion semblable. Il ajoute cependant que ce qu'il faut maintenir constant, c'est le volume d'eau irradié aux diverses distances, plutôt que l'aire du champ d'entrée des rayons. Nous pensons que cette condition serait peut-être nécessaire si l'on faisait varier la distance focus-peau dans de larges limites, mais pour des variations de cette distance de l'ordre de celles que nous avons envisagées dans nos expériences, l'écart résultant des deux manières différentes de procéder reste dans les limites des erreurs expérimentales. Comme il est plus commode pour le radiologiste de prendre en considération le facteur champ plutôt que le facteur volume d'eau irradié, c'est le premier facteur que nous avons adopté. Les distances focus-peau employées communément en radiothérapie profonde,

ne dépassent beaucoup celles de nos expériences. En conséquence, à la précision près requise pour les applications pratiques, nous pouvons énoncer le troisième résultat général suivant :

III. — *Si tous les « facteurs du dosage », à l'exception de la distance focale, sont les mêmes, les rapports des doses profondes à la dose superficielle dépendent de la loi des carrés des distances.*

Nous désignons sous le terme de « facteur du dosage » :

- a) Le voltage ;
- b) Le courant cathodique traversant l'ampoule ;
- c) Le champ ;
- d) Le filtre ;
- e) La distance focus-peau ;
- f) La profondeur (dans l'eau ou dans les tissus).

D'autres facteurs exercent aussi une influence sur la dose reçue, mais nous n'en tiendrons pas compte d'une manière explicite ici (*) ; bien entendu, ces facteurs doivent aussi demeurer constants

Les limites entre lesquelles cette généralisation pratique est applicable sont évidentes, après ce que nous venons de dire.

De l'énoncé général N° III il résulte que si nous connaissons, pour une distance focale donnée, le rapport entre la dose en profondeur mesurée et la même dose calculée par application de la loi des carrés des distances, nous pourrons prévoir quelle sera la dose mesurée à la même profondeur pour une autre distance focale, toutes autres conditions

(*) Voir plus loin.

restant les mêmes. C'est-à-dire que les rapports qui figurent dans les colonnes D et G du tableau VIII peuvent s'appliquer à toutes les distances focales utilisées ordinairement en pratique.

A titre d'exemple, nous allons déterminer par le calcul la radiation effective, à diverses profondeurs dans l'eau, pour une distance focale de 60 cm. les autres facteurs de la dose étant les mêmes que pour les courbes de la figure 7, c'est-à-dire :

Voltage max. : 200 KV.

Courant cathodique : 4 ma. (*).

Champ : 120 cm². Filtre : 0,42 mm. de cuivre.

TABLEAU IX

CHAMP: 120 cm ² FILTRE: 0,42 mm. Cu DISTANCE F-P: 60 cm.			
PROFONDEUR CM	$100 \frac{x^2}{(x+z)^2}$	RAPPORT MOYEN	RAD. EFF.
A	B	C	D
0	100,0	1,0000	100,0
2	93,7	1,015	95,2
4	88,0	0,889	78,2
7	80,2	0,674	54,0
10	73,4	0,487	35,7
15	64,0	0,283	18,1

(*) Le courant cathodique (qui traverse l'ampoule) ne joue pas un rôle direct dans les doses exprimées en pourcentage de la dose superficielle.

Dans le tableau IX, les chiffres de la colonne B représentent l'intensité du rayonnement aux diverses profondeurs, intensité calculée au moyen de la loi des carrés des distances ; les chiffres de la colonne C sont extraits du tableau VIII (valeurs moyennes). Le produit des deux nous donne (colonne D) les pourcentages de la radiation effective aux diverses profondeurs. En comparant ceux-ci avec les pourcentages correspondants aux distances focales de 52,7 et 73,5 cm. (colonne B et E du tableau VIII), on voit que les valeurs trouvées tombent entre les deux valeurs correspondantes de ce tableau ; il était logique de le prévoir étant donné la valeur de la distance focus-peau.

Nous pourrions de même, en utilisant les généralisations I et II calculer, pour cette même distance focale, les pourcentages de la radiation effective à diverses profondeurs, pour des champs et pour des filtres différents ; nous reviendrons sur ce sujet un peu plus loin.

§ 4° DOSES EN SURFACE ET LA LOI DES CARRES DES DISTANCES

Les résultats que nous avons exposés jusqu'ici nous permettent de calculer le pourcentage de la radiation effective à une profondeur quelconque et pour des distances focales, des champs et des filtres variés, pourvu que ces facteurs ne dépassent pas sensiblement les limites qui leur ont été assignés dans nos expériences. Cela revient à dire que nous pouvons calculer les doses en profondeur en fonction de la dose superficielle. Mais il est nécessaire aussi en pratique de pouvoir administrer une même dose superficielle, dans des conditions différentes.

On trouve dans la littérature radiologique de nombreuses discussions sur la validité de la loi des carrés des distances. Cette loi, purement géométrique, est toujours exacte, à condition que la source soit punctiforme et que le rayonnement se propage en ligne droite. Il ne peut donc s'agir, en vérité, de la validité de cette loi, mais seulement de savoir si on peut l'appliquer aux problèmes de la radiothérapie.

Tout d'abord on sait que la source de rayons n'est jamais rigoureusement un point géométrique et que, d'autre part, l'interposition des filtres modifie plus ou moins la propagation du rayonnement en produisant des rayons secondaires et diffusés. En outre, ce qui intéresse particulièrement à cet égard le radio-

logiste, c'est l'action du rayonnement sur la peau. Cette action n'est pas provoquée seulement par le rayonnement incident, les rayons diffusés par les tissus sous-jacents et les rayons secondaires émis par ces tissus y participent aussi. Cela nous permet de conclure à priori que la loi des carrés des distances ne s'applique pas rigoureusement au calcul de la dose superficielle.

Nous avons abordé cette question du point de vue expérimental, nous proposant d'étudier la variation de la dose superficielle en fonction de la distance focale, et pour des champs et des filtres différents. Nous avons utilisé dans ces expériences la même chambre d'ionisation, dans le but de modifier le moins possible la topographie du milieu diffuseur, et de pouvoir effectuer des mesures ne portant que sur une petite portion du cône des radiations incidentes.

Nous avons opéré à trois distances focales différentes (50,9 — 60,6 et 73,5 cm.) avec des filtres de 3,27 mm. d'aluminium, 0,42 et 0,84 mm. de cuivre et des diaphragmes rectangulaires de (5×7) et (7×10) cm², situés à 40 cm. de distance de l'anticathode. Nous avons aussi utilisé d'autres diaphragmes pour obtenir des champs d'entrée égaux aux trois distances ci-dessus.

Dans une série d'expériences, la chambre d'ionisation était à moitié immergée dans l'eau (l'axe géométrique de cette chambre étant dans le plan de la surface libre de l'eau) ; dans une autre série, la chambre était maintenue horizontalement dans l'air

sans fantôme. Le voltage max. était dans tous les cas de 200 KV., le courant cathodique de 4 ma.

TABLEAU X

Variation de la radiation effective à la surface en rapport
à la distance focale.

CHAMBRE D'IONISATION A MOITIE IMMERGEE					
DIAPHRAGME ET FILTRE A 40 CM DV FOCUS					
X CM	FILTRE EN mm			MOYENNE	$100 \frac{50,9^2}{X^2}$
	3,27 Al	0,42 Cu	0,84 Cu		
	DIAPHRAGME : 5x7 cm ²				
50,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
60,6	71,3	71,9	70,2	71,1	70,6
73,5	46,7	48,8	48,2	47,9	47,8
	DIAPHRAGME : 7x10 cm ²				
50,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
60,6	70,4	70,2	71,8	70,8	70,6
73,5	47,4	48,5	48,8	48,2	47,8

De prime abord, les résultats trouvés ne se montraient pas du tout en accord avec la loi des carrés des distances; cela venait de ce que nous recherchions cet accord parmi les chiffres trouvés aux diverses distances *avec des champs égaux*. Mais en exa-

minant les mesures faites *avec des diaphragmes égaux*, (diaphragmes situés à distance constante de l'anticathode) c'est-à-dire avec des cônes de rayonnement de mêmes angles au sommet, nous avons trouvé que l'accord avec la loi des carrés des distances était satisfaisant. Les chiffres du tableau X permettent de le constater.

L'obligation de conserver le même diaphragme à la même distance du focus, quelle que soit la distance focus-peau, montre la nécessité de conserver le même *faisceau de rayonnement*, si l'on veut que la loi des carrés des distances puisse s'appliquer au problème du dosage superficiel. Il résulte de là que les champs, aux diverses distances focales, doivent croître proportionnellement aux carrés de ces distances. Si l'on opère avec des champs égaux à des distances focales différentes, la loi des carrés des distances ne s'applique pas.

Pour expliquer ce fait on pourrait penser qu'il y a, quand on travaille à des distances focales diverses avec le même faisceau de rayonnement, compensation entre les actions diffusantes du filtre et de l'eau; seulement les choses se passent de la même manière quand la chambre d'ionisation, est placée dans l'air, sans fantôme. Il n'y a pas alors de radiation diffusée par le milieu qui baigne la chambre d'ionisation, l'eau étant absente, et le plancher de bois du laboratoire étant à plus d'un mètre de la chambre d'ionisation. On doit donc attribuer l'effet de compensation que l'on constate, uniquement au rayonnement

diffusé par le filtre. Si l'on change le diaphragme, dans le but de maintenir constant le champ aux diverses distances, on change aussi la surface utilisée du filtre, d'où proviennent les rayons diffusés par le cuivre, et par conséquent on modifie la quantité du rayonnement diffusé.

Quoi qu'il en soit, en toute rigueur, nous ne voyons pas la raison essentielle pour laquelle la loi des carrés des distances ne s'applique avec exactitude pour la détermination de la dose superficielle que si l'on maintient le diaphragme, (et par suite le faisceau de rayonnement) constant.

Nous avons pensé, malgré les essais préalables que nous avons faits, à incriminer le câble qui réunit la chambre d'ionisation à l'électroscope, le rayonnement reçu par ce câble pouvant agir comme cause d'erreur. Mais, en répétant nos expériences sans fantôme, après avoir entouré le câble de plomb, nous avons été conduits aux mêmes constatations que précédemment.

Reprenant nos mesures en modifiant la position du filtre par rapport à la chambre d'ionisation, nous avons constaté que cela modifiait, d'une manière appréciable, le rayonnement qui arrive à la chambre (Friedrich avait déjà fait cette constatation). Il est donc nécessaire, dans des mesures de précision, de spécifier à quelle distance de l'anticathode ou de la peau, est placé le filtre. Dans toutes nos expériences, le filtre se trouvait à 40 cm. du focus.

Les résultats quantitatifs que nous avons rassem-

blés dans le tableau X nous permettent de formuler un nouvel énoncé général :

IV. — *La loi des carrés des distances permet en radiothérapie l'évaluation des doses superficielles à des distances diverses du focus, à condition que le faisceau de rayonnement utilisé demeure le même, quelle que soit la distance focale considérée.*

Il résulte de là que si, dans des conditions d'irradiation déterminées (voltage secondaire, courant cathodique, champ, filtre, distance focale) nous connaissons la dose superficielle appliquée, nous pouvons prévoir-quelle sera pour une distance focale différente la nouvelle dose superficielle, tous autres facteurs de technique (à l'exception du champ) restant les mêmes. Dans ces conditions, le champ varie, d'une distance focale à l'autre, proportionnellement au carré de cette distance. Mais en pratique röntgenthérapie courante, cette obligation est la plupart du temps inadmissible, car les dimensions du champ d'irradiation sont fixées par des considérations biologiques et thérapeutiques et varient d'un patient à un autre. Il est donc utile de pouvoir préciser la correction qu'il faut faire subir aux valeurs, calculées par le jeu seul des carrés des distances, lorsqu'on fait varier les dimensions du champ suivant les nécessités de chaque cas particulier.

Le premier énoncé général que nous avons formulé nous permet de répondre à ce besoin ; il nous dit, en effet, que la variation en fonction de la grandeur du champ, de la radiation effective à une pro-

fondeur quelconque, est indépendants de la distance focale et de l'épaisseur du filtre. Il suffit donc de savoir, quantitativement, comment varie la radiation effective à la surface, en fonction de l'aire du champ, pour une distance focale et pour un filtre particuliers. Or, nous possédons les éléments nécessaires à cette détermination (voir § I), et nous pouvons, en utilisant la courbe 0 de la figure 5, calculer la dose superficielle pour différentes grandeurs de champs. Traitons cela dans un exemple :

Problème. — On sait que pour administrer à la peau une certaine dose avec une distance focale de 50 cm., un champ de 100 cm², les autres facteurs techniques étant définis et restant immuables, la durée de l'irradiation est de 80 minutes. On demande quelle sera le temps d'irradiation nécessaire pour administrer la même dose à la peau, avec une distance focale de 70 cm. et un champ de 100 cm² ?

Solution. — Si sans modifier le faisceau utilisé, on irradiait avec une distance focale de 70 cm., le temps nécessaire pour obtenir la même dose serait par application de la loi des carrés des distances :

$$80 \times \frac{70^2}{50^2} = 156 \text{ minutes.}$$

Mais, dans ces conditions, le champ serait de 196 cm², car le faisceau de radiations incidentes a une section de 100 cm², à 50 cm. du focus. (Voir tableau XI).

TABLEAU XI

DISTANCE CM	AIRE CM ²
30	36
40	64
50	100
600	144
70	196
80	256
100.	400

Or, la courbe 0 de la figure 5 nous apprend que les doses pour deux champs d'irradiation de 100 et 196 cm², toutes autres conditions restant les mêmes, sont dans le rapport de 100 à 106. C'est dire que lorsqu'on réduit le champ de 196 à 100 cm² sans modifier aucun des autres facteurs de l'irradiation, on réduit la dose de 6 %, ou, ce qui revient au même, que pour administrer la même dose avec un champ de 100 cm² au lieu d'un champ de 196 cm², il faut prolonger le temps d'irradiation de 6 %. La solution du problème est donc :

$$156 \times \frac{106}{100} = 165 \text{ minutes.}$$

§ 5° — ETABLISSEMENT D'UNE FORMULE GENERALE
PERMETTANT DE CALCULER LES DOSES
DE RADIATIONS PENETRANTES ADMINISTREES,
EN FONCTION DES DIVERS FACTEURS QUI
CONDITIONNENT L'IRRADIATION

Les résultats quantitatifs que nous avons exposés jusqu'ici nous permettent de comparer des doses données dans des conditions de technique très différentes à tous égards, mais les calculs auxquels on est conduit sont un peu longs. Nous avons cherché à établir une formule empirique, grâce à laquelle le calcul de la dose serait dans chaque cas particulier obtenu par simple substitution aux diverses variables qui y figurent. Les doses ainsi calculables seront exprimées en fonction d'une dose étalon obtenue dans des conditions d'irradiation particulières. Ces conditions sont :

Distance focale : 50cm.

Champ : 100 cm².

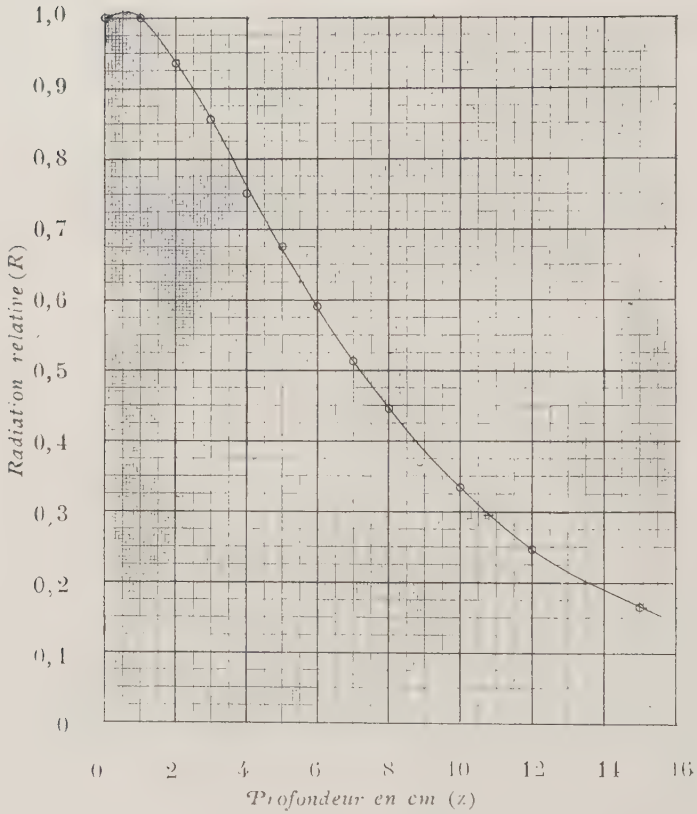
Filtre : 0,5 mm. de cuivre, placé à 40 cm. du focus

Tension max. secondaire : 200 KV.

Courant dans l'ampoule : 4 ma.

Nous obtenons, pour ces conditions précises, une courbe (fig. 8) représentant la distribution en profondeur du rayonnement. Cette courbe expérimentale sera, peut-on dire, la clé de l'équation.

Fig. 8



Courbe Étalon

Distance F-P : 50 c/m.

Champ : 100 cm²

Filtre : 0,5 m/m de cuivre.

En vertu du troisième énoncé général que nous avons donné, nous pouvons par le calcul tracer des courbes analogues pour d'autres distances focales, toutes autres conditions, (et en particulier le champ et le filtre) restant les mêmes.

Le tableau XII contient les facteurs qui nous permettent d'effectuer pareille déduction, par le procédé indiqué au § 3.

La représentation algébrique de cette courbe serait :

$$R = \frac{x^2}{(x + z)^2} \times r_z \quad (1)$$

dans laquelle :

R = radiation effective.

x = distance focale,

z = épaisseur d'eau (ou profondeur dans les tissus),

r_z = une fonction de z , dont les valeurs sont données dans le tableau XII.

Cette équation nous donne la valeur de la radiation effective à chaque profondeur z , exprimée en fonction de la radiation effective à la surface prise comme unité, pour chaque distance focale x (les autres conditions restant les mêmes). Mais elle ne nous permet pas de calculer les doses superficielles pour des distances focales différentes : pour faire cela nous utilisons alors notre quatrième énoncé général, et l'équation devient :

$$R = \frac{50^2}{(x + z)^2} \times r_z \times b_{xA} \quad (2)$$

dans laquelle b_{xA} = une fonction de x et de A nous permettant d'appliquer la loi des carrés des distances au calcul de la dose superficielle quand on maintient constante l'aire du champ (A) aux diverses distances focales, au lieu de conserver le même faisceau de rayons.

On peut obtenir les diverses valeurs de cette fonction b_{xA} en utilisant le procédé donné dans l'exemple du § 4. Pour faciliter les calculs, nous les donnons dans le tableau XIII, (page 57).

TABLEAU XII

Z	r_z
0	1,000
1	1,035
2	1,008
3	0,952
4	0,873
5	0,808
6	0,736
7	0,662
8	0,590
9	0,530
10	0,472
11	0,420
12	0,374
13	0,334
14	0,300
15	0,270

Au point de vue où nous en sommes, l'équation donne la radiation effective R pour différentes distances focales, et aux diverses profondeurs dans l'eau, en fonction de la radiation effective à la surface correspondante à la distance focale de 50 cm., au champ de 100 cm², et au filtre de 0,5 mm. de cuivre (conditions caractérisants la dose étalon).

En utilisant maintenant notre premier énoncé général et les courbes du § I, nous pouvons calculer les valeurs de R lorsque le champ aussi varie, car la variation de la radiation effective en fonction du champ, est à chaque profondeur indépendante de la distance focale et du filtre (dans les limites que nous avons indiquées, bien entendu).

TABLEAU XIII

Valeurs de la fonction $b'_{x/A}$

X EN CM	A EN CM $\longrightarrow$											
	25	50	75	100	150	200	300	400	500	600	800	1000
35	1,083	1,074	1,070	1,068	1,066	1,064	1,062	1,060	1,057	1,052	1,040	1,030
40	1,054	1,049	1,046	1,044	1,043	1,041	1,039	1,037	1,033	1,030	1,020	1,016
50	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
60	0,957	0,963	0,964	0,966	0,968	0,970	0,974	0,977	0,982	0,987	0,995	
70	0,930	0,933	0,936	0,938	0,942	0,947	0,956	0,966	0,971	0,977		
80	0,907	0,911	0,914	0,918	0,924	0,932	0,945	0,958	0,963			
100	0,869	0,875	0,880	0,885	0,897	0,912	0,937	0,952				

L'équation devient donc :

$$R = \frac{50^2}{(x+z)^2} r_z \times b_{zA} \times a_{zA} \dots \dots (3)$$

où a_{zA} = une fonction de z et de A nous permettant de changer aussi l'aire du champ. Au moyen des courbes de la figure 5 nous pouvons calculer les valeurs de la fonction a_{zA} correspondantes à chaque condition particulière de technique. Nous donnons les plus utiles, en pratique, de ces valeurs dans le tableau XIV.

TABLEAU XIV
Valeurs de la fonction a_{zA}

Z EN CM	A EN CM ² →											
	25	50	75	100	150	200	300	400	500	600	800	1000
0	0,869	0,935	0,970	1,00	1,040	1,070	1,105	1,130	1,150	1,160	1,170	1,180
1	0,852	0,928	0,968	1,00	1,042	1,075	1,110	1,135	1,155	1,168	1,180	1,194
2	0,824	0,914	0,963	1,00	1,050	1,080	1,120	1,150	1,170	1,180	1,200	1,220
3	0,790	0,890	0,952	1,00	1,066	1,104	1,144	1,180	1,198	1,212	1,235	1,258
4	0,757	0,868	0,940	1,00	1,080	1,130	1,178	1,215	1,232	1,250	1,278	1,302
5	0,725	0,853	0,933	1,00	1,090	1,150	1,210	1,250	1,270	1,290	1,320	1,340
6	0,704	0,840	0,928	1,00	1,098	1,162	1,233	1,280	1,298	1,330	1,354	1,380
7	0,684	0,830	0,924	1,00	1,104	1,176	1,254	1,306	1,327	1,360	1,390	1,416
8	0,664	0,820	0,920	1,00	1,110	1,188	1,275	1,333	1,354	1,395	1,425	1,458
9	0,650	0,810	0,918	1,00	1,114	1,198	1,298	1,360	1,390	1,428	1,462	1,498
10	0,638	0,800	0,916	1,00	1,120	1,300	1,320	1,390	1,430	1,460	1,500	1,540
11	0,623	0,792	0,914	1,00	1,124	1,210	1,346	1,425	1,470	1,506	1,560	1,600
12	0,618	0,790	0,912	1,00	1,128	1,224	1,372	1,460	1,514	1,560	1,610	1,656
13	0,607	0,788	0,910	1,00	1,132	1,240	1,400	1,500	1,564	1,610	1,675	1,720
14	0,600	0,787	0,909	1,00	1,136	1,253	1,430	1,545	1,620	1,625	1,745	1,790
15	0,598	0,786	0,908	1,00	1,140	1,270	1,460	1,590	1,680	1,740	1,820	1,870

Enfin, par application de l'énoncé général, N° II, nous obtenons l'équation finale :

$$R = \frac{50^2}{(x+z)^2} \times r_z \times b_{x\lambda} \times a_{z\lambda} \times f_{zt} \quad (4)$$

où f_{zt} = une fonction de z et de t nous permettant de varier l'épaisseur (t) du filtre de cuivre. Les diverses valeurs de cette fonction correspondantes aux diverses conditions d'irradiation, peuvent être déduites des courbes de la figure 6 § 2. Nous donnons une série de ces valeurs dans le tableau XV.

TABLEAU XV
Valeurs de la fonction f_{zt}

Z EN CM	t EN mm (CUIVRE)										
	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,50	1,70
0	1,140	1,00	0,890	0,808	0,740	0,684	0,635	0,590	0,548	0,452	0,397
1	1,133	1,00	0,891	0,810	0,742	0,686	0,637	0,593	0,550	0,454	0,399
2	1,127	1,00	0,892	0,812	0,744	0,688	0,639	0,596	0,553	0,456	0,400
3	1,121	1,00	0,893	0,814	0,746	0,692	0,643	0,600	0,558	0,462	0,404
4	1,118	1,00	0,895	0,817	0,749	0,697	0,648	0,606	0,564	0,468	0,408
5	1,115	1,00	0,897	0,820	0,755	0,702	0,653	0,612	0,571	0,475	0,416
6	1,111	1,00	0,899	0,824	0,760	0,708	0,658	0,619	0,578	0,483	0,424
7	1,108	1,00	0,902	0,828	0,765	0,714	0,664	0,626	0,586	0,491	0,432
8	1,105	1,00	0,904	0,832	0,770	0,720	0,671	0,634	0,594	0,500	0,441
9	1,103	1,00	0,906	0,836	0,775	0,726	0,679	0,642	0,602	0,508	0,450
10	1,100	1,00	0,908	0,840	0,781	0,733	0,687	0,650	0,610	0,518	0,460
11	1,098	1,00	0,913	0,842	0,786	0,740	0,694	0,657	0,618	0,526	0,469
12	1,094	1,00	0,915	0,844	0,791	0,745	0,700	0,664	0,626	0,536	0,478
13	1,091	1,00	0,918	0,846	0,797	0,750	0,707	0,671	0,634	0,544	0,487
14	1,088	1,00	0,922	0,848	0,801	0,756	0,713	0,678	0,642	0,553	0,496
15	1,085	1,00	0,925	0,860	0,808	0,763	0,720	0,685	0,650	0,561	0,505

En résumé, l'équation (4) nous permet de calculer la radiation effective à une profondeur quelconque dans chaque cas particulier caractérisé par des valeurs particulières de la distance focale, du champ, et du filtre. Les valeurs ainsi calculées pour R seront exprimées en fonction de la radiation effective superficielle, correspondant aux conditions spéciales suivantes :

Distance focale : 50 cm.

Champ : 100 cm².

Filtre : 0.5 mm. de cuivre.

toutes les autres conditions d'irradiation restantes les mêmes.

Comme de juste, on voit que si on substitue aux variables de l'équation (4) les valeurs particulières correspondantes aux conditions qui caractérisent la dose étalon, on obtient $R = I$.

$$R = \frac{50^2}{(50 + 0)^2} \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 = 1$$

Mais si l'on envisage le problème dans toute sa généralité, il est bien évident que la radiation effective dépend aussi du courant qui traverse l'ampoule et du temps d'irradiation, et cependant nous n'avons pas introduit ces facteurs dans notre équation.

Nous avons fait cela intentionnellement, et voici pourquoi.

a) Tout le monde sait que même quand le voltage secondaire, le courant cathodique, le temps d'irradiation, la distance focale, le filtre et le champ restent invariables, la quantité de rayonnement peut varier notablement d'un appareil à un autre. Les fac-

teurs que nous venons d'énumérer ne suffisent donc pas pour définir complètement la dose puisque d'autres variables, plus ou moins bien connues, exercent leur influence sur le rayonnement émis. Il serait donc nécessaire de pousser plus loin l'analyse des phénomènes pour établir une unité absolue de rayonnement.

b) En pratique, pour utiliser avec fruit l'équation que nous avons établie, il n'est nullement nécessaire d'avoir une quantité absolue de dose. Une unité relative suffit ; car il est plus commode de considérer le courant cathodique et le temps, (qui ne figurent ni l'un ni l'autre dans l'équation) comme des constantes, ainsi d'ailleurs que tous autres facteurs connus ou inconnus, qui ne trouvent pas place dans notre formule. Cela permet de choisir, dans chaque cas particulier, relevant des conditions techniques spéciales, une dose unité particulière. Le radiologiste est libre de choisir lui-même l'unité de dosage qu'il préfère. Seulement s'il choisit les facteurs spéciaux ne figurant pas dans notre équation (courant cathodique, temps d'irradiation, etc...) de façon à pouvoir appliquer la dose unité qu'il a adoptée, avec une distance focale de 50 cm., un champ de 100 cm² et un filtre de 0,5 mm. de cuivre, tous les résultats calculés à l'aide de l'équation seront alors exprimés en fonction de cette dose prise comme unité.

L'exemple suivant va nous permettre d'éclaircir ces derniers points.

Exemple. — Un radiologiste a trouvé qu'avec un

certain appareillage il obtient l'érythème de la peau dans les conditions suivantes :

Voltage : 200 KV. max.

Courant dans l'ampoule : 4 ma.

Distance focale : 50 cm.

Champ à la peau : 100 cm²

Filtre : 0,5 mm de cuivre.

Durée du traitement : 100 minutes.

Il a ainsi réalisé ce qu'il appelle une *dose érythème*. Ces conditions renfermant les facteurs étalon que nous avons choisis antérieurement pour établir notre formule, il pourra l'appliquer directement aux diverses conditions techniques qui lui seront nécessaires et les résultats obtenus seront exprimés en fonction de *cette dose érythème prise comme unité*. Ainsi, s'il effectue une irradiation dans les mêmes conditions que ci-dessus, mais à 60 cm. de distance focale au lieu de 50 cm. la dose administrée dans le même temps sera :

$$R = \frac{50^2}{60^2} \times 1 \times 1.035 \times 1 \times 1 = 0.72$$

c'est-à-dire 72 % de la *dose érythème qu'il a adoptée*.

Nous avons dans cet exemple supposé que le radiologiste avait opéré avec les conditions de distance focale, de champ et de filtre que nous avons choisies nous-mêmes antérieurement pour définir l'unité de dose à laquelle se rapportent les résultats donnés par l'équation, mais cela n'est nullement nécessaire. L'essentiel est que le radiologiste connaisse, ou détermine expérimentalement, la dose érythème pour un ensemble quelconque de conditions de traitement;

puis, grâce à l'équation, il pourra reproduire la même dose, dans des conditions différentes de distance focale, de champ et de filtre, toutes autres conditions (caractérisant le régime de fonctionnement de son ampoule) restant inchangées.

Afin d'illustrer clairement tout ce que nous venons de dire, nous allons traiter un problème type, tel qu'il se présentera au radiologiste, dans son travail courant.

Problème. — Quelle est, en fonction de la radiation superficielle prise comme unité, la radiation effective à la profondeur de 8 cm. pour les conditions suivantes de fonctionnement ?

Tension max. : 200 KV.

Distance focale : 70 cm.

Champ : 300 cm²

Filtre : 1,2 mm. de cuivre.

Solution. — Dans l'équation générale :

$$R = \frac{50^2}{(x + z)^2} \times \frac{r}{z} \times \frac{b}{x^A} \times \frac{a}{z^A} \times \frac{f}{z^t}$$

nous ferons :

$$x = 70 \quad z = 8 \quad A = 300 \quad t = 1,2$$

$$\frac{r}{z} = \frac{r}{8} = 0,590 \quad (\text{Voir tableau XII})$$

$$\frac{b}{x^A} = \frac{b}{70,300} = 0,956 \quad (\text{Voir tableau XIII})$$

$$\frac{a}{z^A} = \frac{a}{8,300} = 1,275 \quad (\text{Voir tableau XIV})$$

$$\frac{f}{z^t} = \frac{f}{8,12} = 0,594 \quad (\text{Voir tableau XV}) \text{ d'où}$$

$$R = \frac{50^2}{(70 + 8)^2} \times 0,590 \times 0,956 \times 1,275 \times 0,594$$

$R = 0,176$ de l'unité que nous avons adoptée, et qui correspond aux conditions particulières énoncées plus haut.

Pour obtenir la valeur de la radiation effective superficielle dans les mêmes conditions d'irradiation et toujours en fonction de la même unité, nous ferons dans l'équation :

$$x = 70 \quad z = 0 \quad A = 300 \quad t = 1,2$$

$$r = 1 \quad b = 0,956 \quad a = 1,105 \quad f = 0,548$$

d'où

$$R = \frac{20}{70^2} \times 1 \times 0,956 \times 1,105 \times 0,548$$

$0,294$ de la même unité.

Et le pourcentage désigné sera :

$$\frac{0,176}{0,294} = 59,3 \text{ } \%$$

Puisque la dose superficielle est de $0,324$ unité dans les conditions qui figuraient dans notre énoncé, si l'on désire donner une dose superficielle égale à une unité, l'irradiation doit durer : $\frac{1}{0,324} = 3,1$ fois plus longtemps que l'irradiation correspondant aux conditions qui caractérisent la dose unité choisie.

Nous allons examiner maintenant dans quelle limite l'équation (4) est applicable.

Tout d'abord l'équation est une formule empirique dans l'établissement de laquelle les considérations théoriques ne jouent presque aucun rôle. Les inductions que nous avons dû faire sont basées toutes sur

les résultats des expériences. Elles correspondent aux quatre généralisations que nous avons formulées.

Or, chacune de ces généralisations s'accorde avec nos mesures (dans les limites expérimentales où nous nous sommes tenus) avec une précision de 2 ou de 3 % ; prenons 2,5 % en moyenne. Il en résulte que les valeurs que l'on calculera au moyen de l'équation seront d'accord avec nos mesures avec une précision

$$\text{de } \sqrt{2,5^2 + 2,5^2 + 2,5^2 + 2,5^2} = 5 \%$$

Les conditions expérimentales extrêmes de nos expériences ont été :

pour la distance focale de 52,7 à 73,5 cm. ;

pour le champ de 20 à 1000 cm² ;

pour le filtre de 0,42 à 1,68 mm. de cuivre et aussi 3,27 mm. l'aluminium

pour la profondeur de 0 à 15 cm. d'eau ;

le voltage a été constamment de 200 KV. max.

On voit donc que les conditions de technique employées couramment en radiothérapie profonde tombent presque entre ces limites.

Toutefois, dans les tableaux concernant les variables de notre équation, nous avons fait figurer des valeurs qui sont en dehors de ces limites. Nous les avons obtenues par extrapolation des courbes expérimentales, et dans ces conditions, l'erreur que l'on commettra, si l'on dépasse les limites expérimentales de nos mesures, ne doit pas être grande.

Nous nous sommes jusqu'ici occupés de la concordance des valeurs calculées à l'aide de l'équation avec les résultats de nos expériences. Il est néces-

saire, maintenant, de voir si des mesures faites avec des appareillages différents de celui qui nous a servi seraient d'accord, dans les conditions expérimentales semblables, avec nos propres mesures.

Si l'on examine les choses de près, on constate que les quatre énoncés généraux auxquels nous sommes parvenus sont indépendants de l'appareillage employé. Mais, d'autre part, nous n'avons travaillé qu'à un seul voltage et nous ne savons pas si les résultats que nous avons trouvés resteraient les mêmes, en travaillant à d'autres tensions (même avec notre appareil). Nous pouvons donc seulement dire que les conclusions générales que nous avons énoncées, peuvent s'appliquer à d'autres appareils, pourvu qu'ils fonctionnent sous la même tension. Il en résulte que l'équation que nous avons établie est valable aussi pour d'autres appareils que le nôtre, mais fonctionnant à 200.000 volts max. Il reste à voir si les valeurs que nous donnons dans nos divers tableaux peuvent être employées lorsqu'on travaille avec d'autres appareils.

On sait que deux appareils différents fonctionnant sous la même tension max. produisent un rayonnement de la même longueur d'onde minimum, longueur d'onde donnée par la loi Planck-Einstein. Mais la longueur d'onde moyenne peut varier notablement d'un appareil à l'autre suivant la forme de l'onde du voltage produite par l'appareil. Cela revient à dire que la qualité (*) du rayonnement peut être

(*) La quantité de rayonnement varie, elle aussi, mais cela n'a aucune importance relativement à l'application de l'équation.

différente (et en général elle l'est), même quand les deux appareils considérés travaillent sous la même tension max. On ne peut pas alors se servir des valeurs que nous donnons pour les variables qui figurent dans l'équation.

Les appareils dont on se sert actuellement en radiothérapie profonde sont de trois types différents :

1° transformateur à circuit magnétique fermé avec commutateur tournant ;

2° bobine avec interrupteur et commutateur tournant (ou soupape) ;

3° transformateur à circuit magnétique fermé chargeant des condensateurs par l'intermédiaire de kénotrons.

En ce qui concerne les ampoules, on tend de plus en plus à n'employer que celles du type Coolidge ; nous ne prendrons donc pas en considération dans notre discussion les ampoules à gaz résiduel.

On peut a priori affirmer qu'il y a des différences notables entre les formes d'onde de voltages produites par les trois types d'appareils que nous venons d'énumérer et que par suite la qualité du rayonnement produit (sous une même tension max.) doit varier d'un type d'appareil à l'autre.

Toutefois, si l'on ne considère que les appareils du premier type, il paraît justifié de penser que tous ces appareils produisent des ondes de formes semblables et, par conséquent, des rayonnements sensiblement de même qualité. Et puisque nos mesures ont été faites avec un appareil de ce type, nous con-

fronterons nos résultats avec ceux qu'ont pu obtenir d'autres expérimentateurs ayant travaillé avec des appareils du même type.

Malheureusement il n'y a pas dans la littérature radiologique beaucoup de travaux nous permettant de comparer des rayonnements au point de vue de leur qualité. Une des principales raisons de ce fait est que les résultats que l'on trouve sont toujours plus ou moins sous la dépendance du dispositif utilisé pour les mesures. Pour faire des comparaisons exactes, il serait nécessaire d'établir dans chaque cas des courbes d'absorption du rayonnement, et cela avec le même appareil de mesures.

Nous donnons dans la figure 19 page 102, des courbes d'absorption obtenues, pour un même faisceau de rayons X, avec des chambres d'ionisation différentes et l'on voit que l'appareil de mesures exerce lui-même une influence notable sur les résultats que l'on obtient. (*).

Mais si l'on opère sur le faisceau après filtration par quelques dixièmes de millimètre de cuivre, les divergences provenant de l'appareil de mesures ne sont pas aussi marquées. (Les chiffres du tableau XX, page 103, déduit des courbes ci-dessus, le montrent).

Dans le même tableau, nous donnons les longueurs d'onde « effectives » déduites par la méthode de Duane de chacune des courbes d'absorption précédentes — dans le cas où le rayonnement est filtré par 0,5 et par 0,75 mm. de cuivre. Nous pouvons comparer ces longueurs d'onde à celles qui ont été don-

(*) Nous reviendrons sur ces courbes un peu plus loin.

nées par d'autres expérimentateurs, pour des appareils de type analogue au nôtre. Duane a fait plusieurs déterminations de ce genre et il dit que pour le rayonnement produit sous une tension max. de 200 KV. et filtré à 0,5 de cuivre, la longueur d'onde effective est d'environ 0,16 u. A. Glasser a trouvé, pour le même voltage, mais avec un filtre de 0,75 mm. de cuivre 0,15 u. A.

Ces deux résultats concordent à peu près avec ceux qui figurent dans notre tableau, mais, étant donné que la détermination de la longueur d'onde effective dépend dans une certaine mesure de l'appareil de mesures employé, la concordance des chiffres de Duane et Glasser avec les nôtres doit seulement être considérée comme une présomption de la similitude des rayonnements.

A peine venions-nous de terminer ce travail (juin 1923) que Erskine a publié des tableaux qui permettent une comparaison directe avec nos propres résultats. Dans ses expériences cet auteur a employé lui aussi, une petite chambre d'ionisation et un fantôme constitué par une cuve pleine d'eau. Bien que Erskine n'ait pas publié dans le détail son dispositif expérimental, il paraît évident qu'il différerait peu du nôtre.

Dans le tableau XVI, nous donnons quelques-unes des valeurs trouvées par Erskine côte à côte avec des valeurs calculées à l'aide de l'équation. La discordance entre les deux dépasse à peine 5 %, et dans trois cas seulement. Comme nous avons dit que nous ne pouvions prétendre par rapport à nos propres

mesures à une précision supérieure à 5 % dans l'emploi de l'équation, la concordance de nos résultats

TABLEAU XVI

CHAMP CM x CM	FILTRE : 0,8 mm Cu			FILTRE : 1,28 mm Cu		
	ERSKINE	EQUATION	ECART	ERSKINE	EQUATION	ECART
DISTANCE F-P : 50 CM						
8 x 8	30,8	31,2	1,3 %	32,5	33,2	2,0 %
15 x 15	40,0	39,5	1,3 %	41,3	42,4	2,6 %
25 x 25	46,5	43,8	6,0 %	49,0	46,4	5,5 %
DISTANCE F-P : 70 CM						
8 x 8	32,5	34,3	5,4 %	35,0	36,8	5,0 %
15 x 15	43,5	43,8	0,7 %	45,0	47,0	4,3 %
25 x 25	48,0	48,5	1,0 %	51,0	51,2	0,4 %

Comparaison des doses à la profondeur de 10cm, calculées au moyen de l'équation, et des valeurs correspondantes données par Erskine.

avec ceux trouvés par Erskine nous paraît satisfaisante.

Tout cela ne nous permet pas d'affirmer, d'une manière définitive, que les tableaux que nous avons fournis pour les variables qui figurent dans l'équation sont valables pour d'autres appareillages que celui que nous avons utilisé. Néanmoins, la concordance que nous venons de constater entre nos résultats et ceux d'autres expérimentateurs, jointe à des considérations d'ordre général, nous permet de penser que l'on ne s'expose pas, en utilisant notre équation et les tableaux qui l'accompagnent, à une erreurs dépassant 10 % dans le calcul des doses appliquées à l'aide d'autres appareils de rayons X de type semblable au nôtre. Or, pour les applications courantes de radiothérapie, une telle précision est satisfaisante, étant donné surtout que certains facteurs peu connus et difficiles à préciser sont susceptibles d'introduire une imprécision d'un ordre supérieur à l'erreur ci-dessus.

Il va sans dire qu'il serait souhaitable que les radiologistes atteignent dans leur dosage, une précision supérieure à 10 %. Ils la pourraient obtenir en faisant des mesures soigneuses avec leurs appareils, mais nous ne pensons pas qu'il faille attacher, d'une manière générale, une grande importance aux mesures que l'on effectue dans les Services de radiothérapie, avec des dosimètres divers pour déterminer les doses en profondeur. La construction du dosimètre (et particulièrement de la chambre d'ionisation), la technique employée pour les mesures, ont une grande influence sur les résultats obtenus. Prenant en considération les difficultés inhérentes

aux expériences de ce genre, nous pensons que le radiologiste a, en général, intérêt à utiliser les résultats obtenus (en s'entourant de toute la minutie nécessaire) dans les laboratoires de physique, à la condition qu'il choisisse parmi les résultats ainsi établis scientifiquement, ceux qui l'ont été dans des conditions de technique aussi voisines que possible des siennes. C'est dans ces conditions que nous pensons que le radiothérapeute trouverait avantage à utiliser notre équation et les tableaux qui l'accompagnent.

Après ce que nous venons de dire, il est sans doute superflu d'ajouter que l'on ne peut pas employer notre équation et nos tableaux si l'on travaille avec des appareillages à bobine ou avec des appareillages donnant du courant continu haute tension ; on pourrait alors s'exposer à des erreurs considérables. Ces restrictions n'ont pas une grande importance en pratique, (aux Etats-Unis tout au moins) car la plupart des appareils utilisés en radiothérapie sont du même type que celui sur lequel nous avons travaillé. Les appareils à bobine tendent à disparaître ; ceux qui fournissent du courant continu haute tension n'existent encore qu'en très petit nombre, quoiqu'ils paraissent devoir être les appareils d'avenir. Il faudra alors, reprendre nos expériences et déterminer à nouveau les fonctions figurant dans notre équation à l'aide de mesures effectuées avec soin sur un appareil de ce type et l'on pourra alors appliquer ces résultats à tous les autres appareils du même type, sans craindre d'erreurs notables. En fait l'accord entre les doses calculées et celles mesurées sera

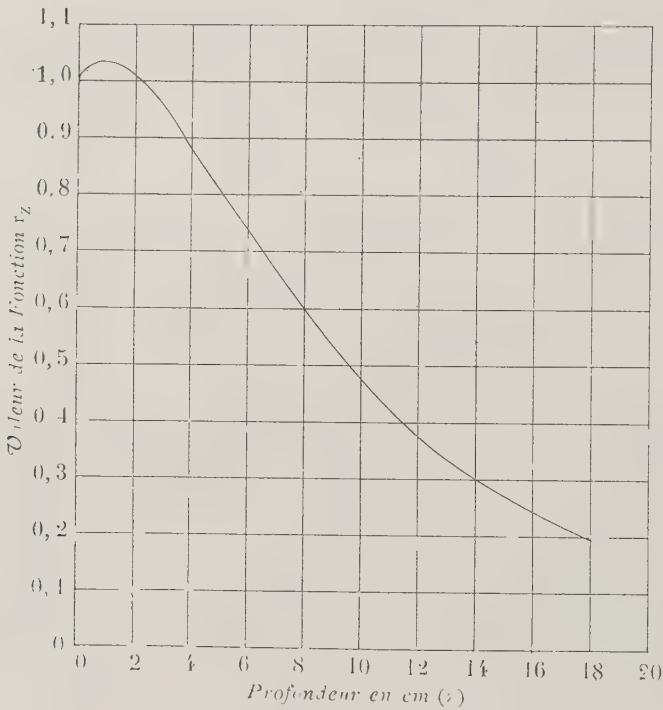
mieux, car si les condensateurs utilisés sont de capacité suffisante, on obtient dans tous les cas la même forme d'onde du voltage (pratiquement une ligne droite), et la qualité du rayonnement sera exclusivement déterminée par la tension à l'ampoule (et par la nature du métal de l'anticathode).

Avant de quitter ce sujet, nous voulons attirer l'attention du lecteur sur quelques points pratiques de notre équation. Si l'on parcourt la littérature radiologique, on constate que la plupart des radiologistes emploient chacun des techniques personnelles différentes de celles des autres. On trouve la plus grande diversité dans les filtres utilisés, les distances focales et les champs d'application, bien que la tension avec laquelle ils travaillent tous soit à peu près toujours la même (200 KV max.), en radiothérapie profonde tout au moins. Or, dans ces conditions, la comparaison des doses est à peu près impossible à moins que l'on ne se contente d'une approximation très grossière. En utilisant notre équation on pourrait, au contraire, se faire une idée beaucoup plus exacte des doses employées par les divers radiologistes, et cela permettrait aussi de mieux comparer les résultats cliniques. De même on pourrait comparer les résultats d'expériences faites dans des conditions de distance, de champ, de filtration et de profondeur très différents les uns des autres.

Les tableaux de valeur que nous avons donnés pour les fonctions qui figurent dans notre équation conviennent aux conditions de travail les plus courantes en radiothérapie. Pour faciliter l'interpola-

tion à des conditions de traitement différentes, lorsque cela est nécessaire, nous donnons aussi les courbes des figures 9, 10, 11, 12 et 13 ; on peut aussi se reporter dans le même but aux courbes des figures 6 et 7.

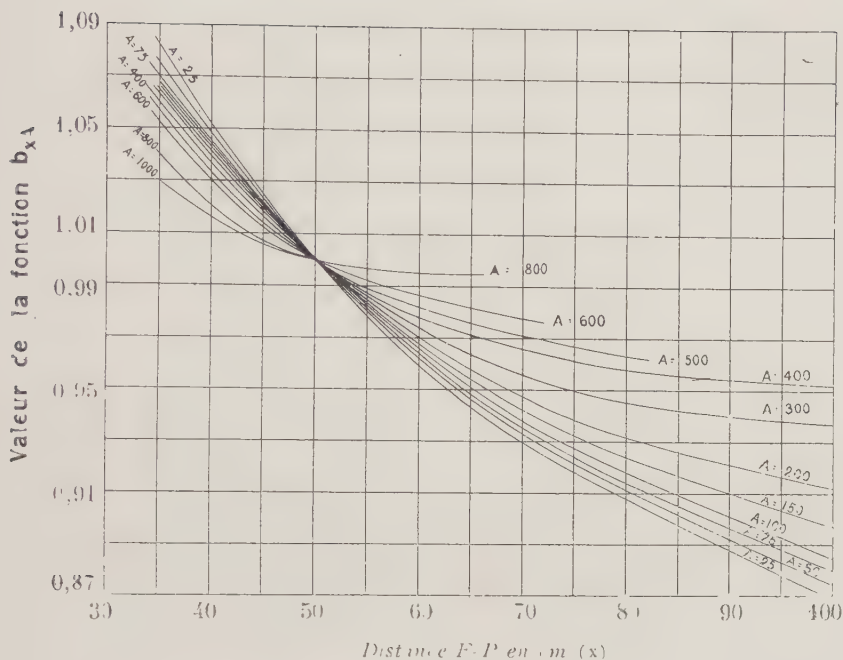
Fig. 9



Graphique de la Fonction r_z

Nous avons donné, dans les tableaux, les chiffres avec une précision beaucoup plus grande que celle que nous avons assignée aux résultats des calculs. Nous avons fait cela parce que, bien qu'on ne puisse pas prétendre à une précision supérieure au 5 %

Fig. 10

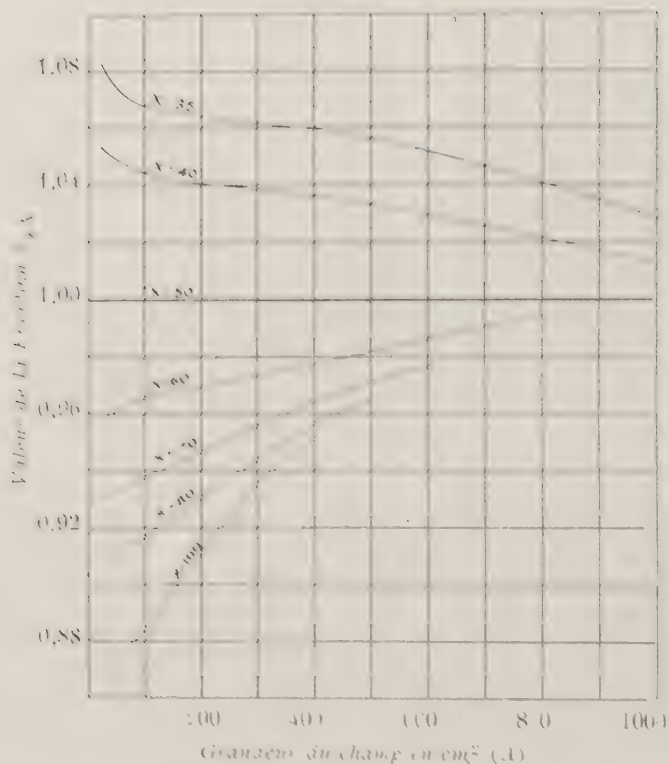


Graphique de la Fonction b_{xA} pour des valeurs diverses de A

pour les résultats de l'équation, par rapport aux doses mesurées, les valeurs relatives des diverses fonctions, ayant été déduites des courbes moyennes des expériences, sont connues avec une précision notablement plus grande.

Pour transporter dans le domaine des applications pratiques de radiothérapie, les résultats de nos expériences, soit en se servant de l'équation, soit par tout autre moyen, il est indispensable de respecter une condition d'importance capitale : le milieu diffusant irradié (en l'occurrence, une région du corps du pa-

Fig. 11

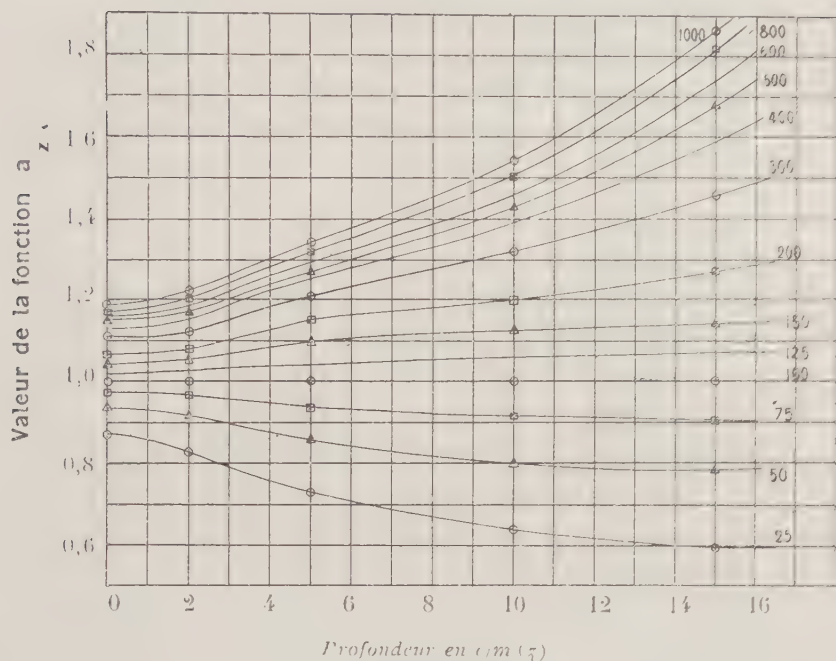


Graphique de la fonction $b_{x\Lambda}$ pour des valeurs diverses de x (le patient) doit avoir un volume (*) et des dimensions géométriques aussi voisins que possible de ceux de notre fantôme. Or, en pratique, ce volume varie, chez un même malade, avec la région du corps que l'on irradie ; elle varie aussi d'un patient à un autre. Si, par exemple, on irradie un bras dont le volume est naturellement très petit en comparaison de celui de notre

(*) Les expériences de Friedrich et celles de nombreux autres expérimentateurs ont montré que l'absorption des rayons X par l'eau est sensiblement la même que pour les tissus humains.

Fig. 12

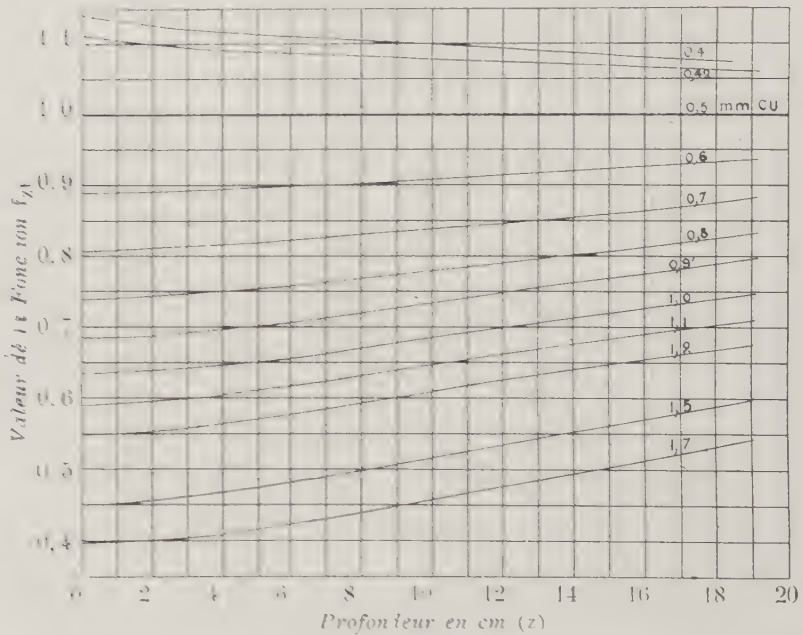
Graphique de la Fonction ε_{zA} pour des valeurs diverses de A



fantôme, on ne peut s'attendre à ce que la distribution du rayonnement y soit la même que dans le fantôme. Il faut alors, pour travailler dans des conditions comparables à celles dans lesquelles nous avons opéré, accroître le volume de la partie à traiter jusqu'à lui donner sensiblement celui du fantôme. On y arrive aisément à l'aide de plaques de paraffine et de ballons de caoutchouc à moitié remplis d'eau dans lesquels on insère la partie du corps que l'on veut traiter. Cela se pratique, d'ailleurs, dans certaines cliniques, dans le dessein d'augmenter la quantité

de rayonnement diffusé, et des substances variées sont employées dans ce but. Des carcasses en bois de la même grandeur que le fantôme disposées autour de la région anatomique à traiter, sont d'un emploi très commode. Quand pour les remplir on utilise des ballons de caoutchouc, renfermant de l'eau, il est important d'en avoir de tout petits et il faut, en outre, qu'ils ne soient pas complètement remplis d'eau,

Fig. 13

Graphique de la Fonction f_z pour des valeurs diverses de t

afin qu'ils puissent épouser aussi bien que possible les formes irrégulières du volume que l'on veut combler. On peut ainsi se rapprocher grandement, pen-

dant le traitement, des conditions expérimentales du laboratoire, en même temps que l'on améliore sensiblement le rendement en profondeur.

L'équation que nous avons donnée se prête, dans sa forme (4), aux calculs généraux des doses en surface et des doses en profondeur, rapportées à la dose obtenue dans des conditions particulières (distance focale 50 cm, champ 100 cm², filtre 0,5 mm. de cuivre), toutes autres conditions restant les mêmes. Mais si, pour chaque distance de traitement, l'on désire seulement connaître les doses profondes en fonction de la dose superficielle, on peut modifier l'équation et rendre ainsi plus simples les calculs. En effet :

$$R \% = 100 \frac{R \text{ prof}}{R \text{ surf}} = 100 \frac{x^2}{(x+z)^2} \times r \times \frac{a_{zA}}{a_{0A}} \times \frac{f_{zI}}{f_{0I}} \quad (5)$$

$$R \% = 100 \frac{X_z^2}{(x+z)^2} \times r \times \alpha_{zA} \times \Phi_{zI} \quad (6)$$

où α_{zA} et Φ_{zI} sont des nouvelles fonctions que l'on peut déduire aisément des tableaux précédents. Nous donnons un certain nombre de valeurs de α_{zA} et de Φ_{zI} dans les tableaux xvii et xviii.

A titre d'exemple, nous allons résoudre, au moyen de l'équation (6) le problème de la page 64. Pour obtenir la dose à la profondeur de 8 cm. en fonction de la dose superficielle, quand la distance focale est de 70 cm, le champ 300 cm² et le filtre 1,2 mm. de cuivre nous écrirons :

$$R \% = \frac{70^2}{(70+8)^2} \times 0,590 \times 1,153 \times 1,083 \quad 59 \%$$

C'est bien la valeur que nous avons trouvée plus haut.

TABLEAU XVII

Valeurs de la fonction ε
Z A

Z EN CM	A EN CM ² →											
	25	50	75	100	150	200	300	400	500	600	800	1000
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,98	0,99	0,10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01
2	0,95	0,98	0,99	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03
3	0,91	0,95	0,98	1,00	1,02	1,03	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05	1,07
4	0,87	0,93	0,97	1,00	1,04	1,06	1,07	1,08	1,08	1,08	1,09	1,10
5	0,83	0,91	0,96	1,00	1,05	1,07	1,09	1,11	1,11	1,11	1,13	1,14
6	0,81	0,90	0,96	1,00	1,06	1,09	1,12	1,13	1,13	1,15	1,16	1,17
7	0,79	0,89	0,95	1,00	1,06	1,10	1,13	1,16	1,16	1,17	1,19	1,20
8	0,76	0,88	0,95	1,00	1,07	1,11	1,15	1,18	1,18	1,20	1,22	1,24
9	0,75	0,87	0,95	1,00	1,07	1,12	1,17	1,20	1,21	1,23	1,25	1,27
10	0,73	0,86	0,94	1,00	1,08	1,12	1,19	1,23	1,24	1,26	1,28	1,31
11	0,72	0,85	0,94	1,00	1,08	1,13	1,22	1,26	1,28	1,30	1,33	1,36
12	0,71	0,85	0,94	1,00	1,08	1,14	1,24	1,29	1,32	1,34	1,38	1,40
13	0,70	0,84	0,94	1,00	1,09	1,16	1,27	1,32	1,36	1,39	1,43	1,46
14	0,69	0,84	0,94	1,00	1,09	1,17	1,29	1,37	1,41	1,44	1,49	1,52
15	0,69	0,84	0,94	1,00	1,10	1,19	1,32	1,41	1,46	1,50	1,55	1,58

TABLEAU XVIII

Valeurs de la fonction Φ
z t

Z EN CM	t EN MM. (CVIVRE)									
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,7
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
1	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01
2	0,99	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
3	0,98	1,00	1,00	1,01	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,02
4	0,98	1,00	1,01	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03
5	0,98	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02	1,03	1,04	1,04	1,05
6	0,97	1,00	1,01	1,02	1,03	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07
7	0,97	1,00	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
8	0,97	1,00	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08	1,11
9	0,97	1,00	1,02	1,03	1,05	1,06	1,07	1,09	1,10	1,13
10	0,97	1,00	1,02	1,04	1,06	1,07	1,08	1,10	1,12	1,16
11	0,96	1,00	1,03	1,05	1,07	1,08	1,09	1,11	1,13	1,18
12	0,96	1,00	1,03	1,05	1,08	1,09	1,11	1,13	1,14	1,18
13	0,96	1,00	1,03	1,06	1,08	1,10	1,12	1,14	1,16	1,20
14	0,95	1,00	1,04	1,06	1,09	1,11	1,13	1,15	1,17	1,22
15	0,95	1,00	1,04	1,07	1,10	1,12	1,14	1,16	1,18	1,24

§ 6 — DE LA RECHERCHE DES « CONDITIONS LES PLUS
ECONOMIQUES » DANS L'ADMINISTRATION
DES DOSES

Plusieurs moyens s'offrent au radiologiste pour augmenter la radiation effective à une certaine profondeur tout en conservant la même dose à la surface, (le voltage secondaire restant le même). Il peut augmenter la distance focale, agrandir le champ ou employer un filtre plus épais ; ou bien faire varier simultanément et de manière convenable plusieurs de ces trois facteurs. (*) En fait, dans la pratique radiothérapique courante, les considérations cliniques fixent, en général dans chaque cas, les dimensions du champ que l'on doit employer, et il ne reste guère que la possibilité de faire varier dans certaines limites la distance focale et la filtration.

Or, la variation de chacun de ces deux facteurs entraîne une variation de la durée du traitement nécessaire pour administrer une même dose superficielle. Sans faire une analyse détaillée de ces questions, il est bien évident que, pour administrer une même

(*) Nous ne prenons pas en considération ici l'accroissement du volume car, ainsi que nous l'avons signalé, pour que nos résultats soient utilisables en pratique, il faut que le volume des tissus irradiés soit dans tous les cas comparable à celui de notre fantôme.

dose relative (*) à une profondeur déterminée il doit exister une combinaison optimum des facteurs distance focale et filtre. Cette combinaison sera celle qui permettra l'administration des doses voulues dans le temps minimum.

Nous avons établi, en nous servant de l'équation (4), une méthode graphique permettant de déterminer cette combinaison optimum pour des conditions de traitement différentes. Le diagramme que nous donnons dans la figure 14 a été établi pour les conditions fixes suivantes : champ 400 cm², profondeur 10 cm. Les courbes M représentent dans ces conditions la variation de la *dose relative* en fonction de la distance focale et de l'épaisseur du filtre ; les courbes N représentent dans les mêmes conditions la variation de la *dose absolue* — rapportée à l'unité arbitraire précédemment définie — en fonction de la distance focale et de l'épaisseur du filtre. Nous allons expliquer sur un exemple l'emploi de ce diagramme.

Problème. — On désire obtenir une dose relative de 40 % à la profondeur de 10 cm, avec un champ de 400 cm². Déterminer les conditions (distance focale et filtre) les plus économiques de traitement.

Solution. — Du point correspondant à 40 % sur l'échelle des doses relatives (moitié supérieure de

(*) Dans le but de simplifier le langage et d'éviter une répétition fastidieuse, nous emploierons dorénavant l'expression « dose relative » pour désigner « la radiation effective à une certaine profondeur, exprimée en pourcentage de la radiation effective à la surface dans les mêmes conditions de traitement ».

Fig. 14

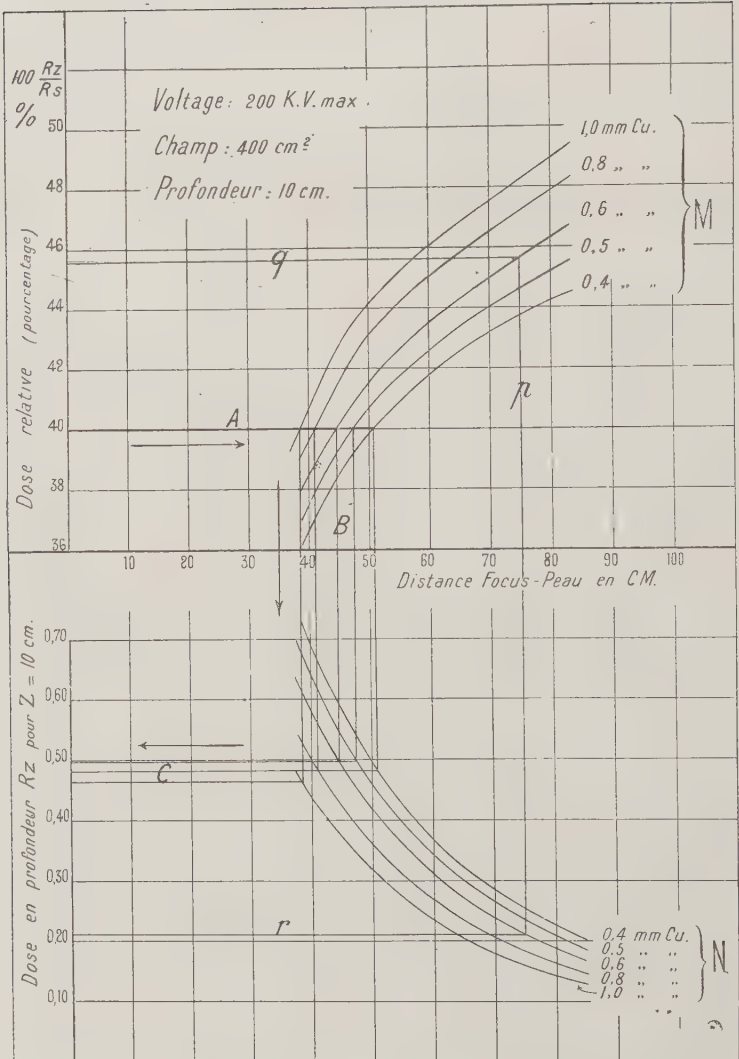


Diagramme pour la détermination des " Conditions
les plus économiques " d'Irradiation

l'axe des ordonnées) menons une parallèle à l'axe des abscisses. Des points d'intersection de cette droite avec les courbes M, menons des parallèles B à l'axe des ordonnées. Les points où ces droites coupent l'échelle des distances focales (axe des abscisses) nous donnent les distances focales qu'il est nécessaire d'employer pour chaque filtration, si l'on veut obtenir une dose relative de 40 %. Les couples de valeur ainsi trouvés seront :

Filtre de 1mm. de cuivre et distance foc. de 38,5 cm.

0,8	»	»	»	41
0,6	»	»	»	44,5
0,5	»	»	»	47,5

etc

Mais de toutes ces combinaisons, une doit être plus économique que les autres, celle qui permet d'appliquer la dose voulue dans le temps le plus court. Pour déterminer cette condition optimum, de chaque point d'intersection des courbes N avec les droites B correspondantes (que nous avons menées parallèlement à l'axe des ordonnées), menons maintenant des parallèles C à l'axe des abscisses jusqu'à leur intersection avec l'échelle des doses en profondeur R z. La droite C qui nous donne la valeur de R z la plus élevée correspond à la combinaison de distance focale et de filtre la plus économique. On voit immédiatement que pour le problème que nous nous proposons de résoudre ici, cette combinaison consiste en une distance focale de 44,5 cm. et un filtre de 0,6 mm. de cuivre. Il est à remarquer qu'un filtre plus mince aussi bien qu'un filtre plus épais nous donne-

Fig. 15

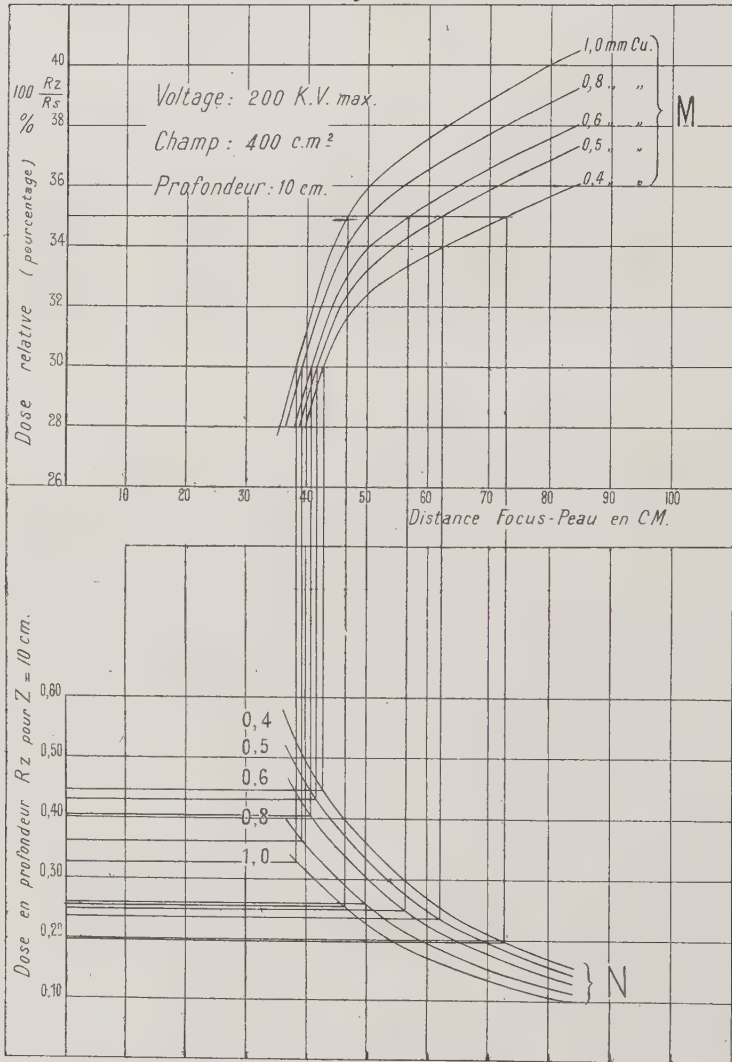


Diagramme pour la détermination des " Conditions les plus économiques " d'Irradiation

TABLEAU XIX

CHAMP = 100 cm ² , PROFONDEUR = 10 cm						
R _Z : R _S = 0,35			R _Z : R _S = 0,30			
FILTRE	DISTANCE F P cm.	R _Z	R _Z %	DISTANCE F P cm.	R _Z	R _Z %
0,4	73,0	0,200	77	428	0,447	100,0
0,5	62,0	0,235	90	418	0,430	96,2
0,6	56,6	0,247	95	409	0,407	91,0
0,8	50,0	0,260	100	393	0,367	82,0
1,0	46,7	0,253	97	383	0,331	74,0

rait une valeur plus faible pour R_Z, bien que la différence ne soit pas grande pour les épaisseurs voisines de 0,6 mm. de cuivre.

On obtiendrait une différence plus marquée en

changeant les conditions du problème. Pour le montrer, nous nous servirons du diagramme de la figure 15 qui est établi pour un champ de 100 cm² et une profondeur de 10 cm. Les diverses combinaisons de distance focale et de filtre permettant d'administrer des doses relatives de 35 % et de 30 % sont rassemblées dans le tableau XIX.

On voit que les conditions les plus économiques pour une dose relative de 35 % sont :

Distance focale 50 cm. et filtre 0,8 mm. de cuivre tandis que, pour une dose relative de 30 % elles sont :

Distance focale : 42,8 cm et filtre : 0,4 mm. de cuivre.

Nous n'avons pas dans notre diagramme de courbe pour des filtrations inférieures à 0,4 de cuivre, et nous ne savons pas si nous pourrions obtenir un rendement supérieur avec de tels filtres. Il faut remarquer qu'il y a une différence marquée entre la valeur de R_z correspondant aux conditions optimum et la valeur correspondant à certaines autres combinaisons de distance focale et de filtre que l'on pourrait employer en pratique. Par exemple, en nous plaçant dans le cas de la dose relative de 30 % si l'on employait une distance focale de 38,3 cm. et un filtre de 1 mm. de cuivre, il faudrait une irradiation plus longue de 35 % que pour les conditions optimum :

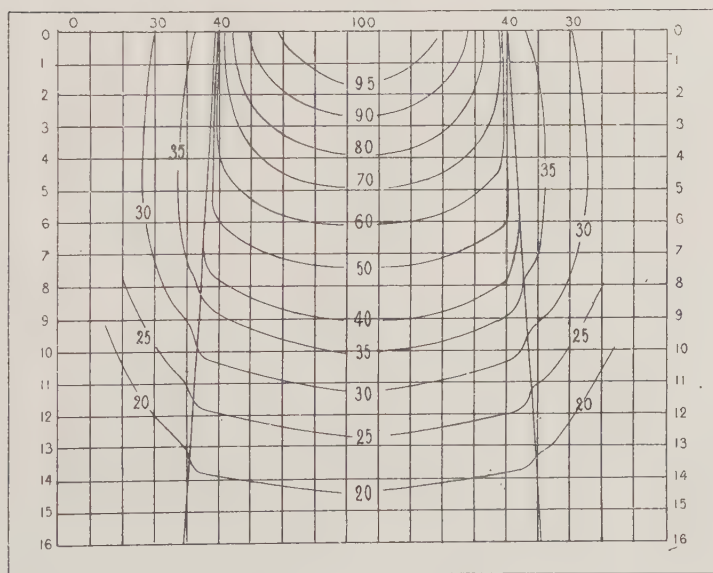
$$\frac{1}{0,74} = 1,35$$

Avant d'aller plus loin, nous allons discuter deux points particuliers qui se sont certainement présentés

à l'attention du lecteur. Nous commencerons par le plus simple :

Lorsqu'il s'agit de traiter un malade, on ne doit pas seulement connaître la dose administrée en un certain point, mais il faut aussi savoir comment est distribué le rayonnement dans toute la tumeur et dans les tissus adjacents. Dans ce but, il est nécessaire d'avoir des diagrammes du type de celui de la figure 16. Mais dans la discussion actuelle, il suffit d'étudier

Fig. 16

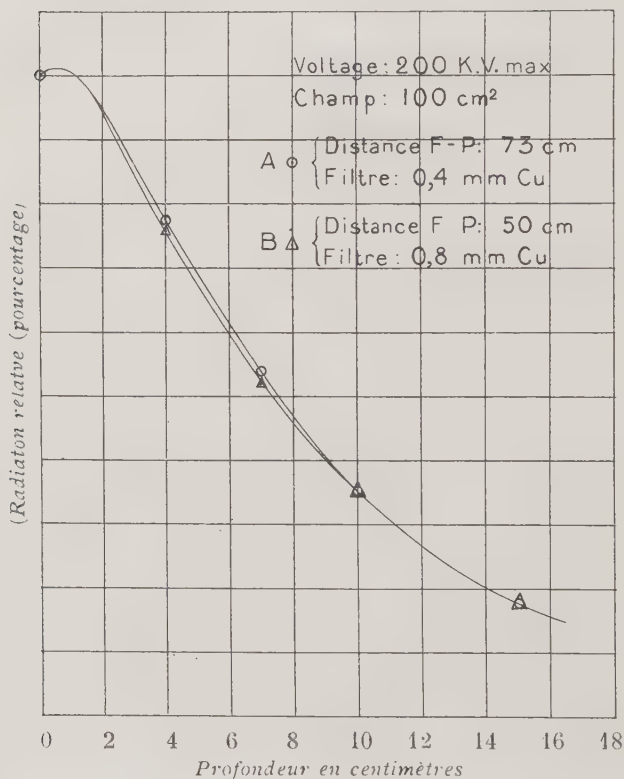


CHAMP "Isodoses"
 Distance F - P : 50 cm
 Champ : 100 cm²
 Filtre : 1,0 m/m de cuivre

la distribution sur l'axe du faisceau de rayons. Il s'agit donc seulement de vérifier si les diverses com-

binaisons de distance et de filtre qui permettent d'obtenir la même dose relative à une certaine profondeur, nous donnent à peu près la même distribution. Or nous pouvons nous faire une opinion à ce sujet en examinant la figure 17. Les deux courbes

Fig. 17



Comparaison de la distribution du Rayonnement en profondeur

de cette figure correspondent aux conditions suivantes :

- A) distance focale, 73 cm, filtre 0,4 mm. de cuivre.
- B) » » 50 » » 0,8 » »

les autres facteurs étant identiques. Ces deux combinaisons nous donnent la même dose relative de 35 % à 10 cm. de profondeur comme le demande le problème ci-dessus. Or, on voit que ces deux courbes coïncident à peu près, l'écart le plus grand n'atteignant pas 3 % ; et cependant elles correspondent à des conditions très différentes de distance focale (73 et 50 cm) et de filtre (0,4 et 0,8 mm. de cuivre). Nous pouvons donc en conclure que les diverses combinaisons de distance focale et de filtre qui satisfont à la condition d'égalité de dose à une certaine profondeur, nous donnent des distributions identiques du rayonnement, au moins si l'on ne s'écarte pas trop de la profondeur considérée.

Le second point est beaucoup plus délicat à discuter. Il se rapporte à la question des effets biologiques de rayonnements de qualités différentes.

Nous venons de voir que l'on peut choisir, soit un filtre de 0,4 mm, soit un filtre de 0,8 mm. de cuivre pour obtenir une même dose profonde. Mais les rayonnements utilisés dans les deux cas ne seront pas de même qualité ; pouvons-nous dire que nous obtiendrons néanmoins les mêmes effets biologiques ? En l'état actuel de nos connaissances, on ne peut fournir une réponse catégorique à cette question. Mais on peut l'envisager de la manière suivante. Si la filtration employée est dans tous les cas suffisante pour que la qualité du rayonnement utilisé ne change sensiblement pas en traversant une épaisseur notable de tissus, la question se simplifie grandement. Ce qu'il importe de considérer, en effet, c'est

la sensibilité relative des cellules de l'épiderme et des cellules que l'on désire influencer dans la profondeur des tissus. Si le rapport de ces deux sensibilités ne change pas lorsque l'on passe de l'une à l'autre des longueurs d'onde que l'on peut utiliser, une différence dans la qualité du *rayonnement incident* n'exercera pas d'influence appréciable sur les effets biologiques obtenus. On sait, par exemple, que les cellules qui sont très sensibles à l'action des rayons X sont aussi très sensibles à l'action de rayons gamma du radium dont la longueur d'onde est cependant fort différente. Il n'est donc pas invraisemblable de penser que, entre les limites de longueurs d'onde modérément espacées les *rapports de sensibilité des cellules* ne changent sensiblement pas. (*) En outre, les expériences de Krönig et de Friedrich ont montré que lorsqu'on effectue les mesures de rayonnement avec une petite chambre d'ionisation construite convenablement, il y a sensiblement parallélisme entre les mesures ionométriques et certains effets biologiques même pour des rayonnements de qualités différentes.

Mais, en définitive, la question de la différence d'actions biologiques de rayonnements de longueurs d'onde différentes n'ayant pas été complètement élucidée, il serait dangereux de donner ici des conclusions formelles. Ce que nous nous proposons seulement, c'est de fournir une méthode permettant de déterminer aisément les facteurs nécessaires à l'ob-

(*) La confusion des idées souvent exprimées sur ce sujet est due, pour une grande partie, au fait qu'en changeant la qualité du rayonnement on a aussi changé la quantité, alors même que l'on pensait la maintenir constante.

tention, avec des filtres d'épaisseurs différentes, d'une même dose à une profondeur déterminée. (Par l'expression « même dose » nous entendons mêmes effets d'ionisation dans notre petite chambre). Nos méthodes permettent de déterminer un filtre particulier réalisant les conditions de traitement les plus courtes. Il appartient, à des recherches biologiques, de dire si les conditions qui nous paraissent optimum du point de vue physique coïncident aussi avec les conditions biologiques les plus favorables.

Revenant maintenant à notre sujet, nous allons indiquer quelques autres applications pratiques de notre diagramme. Le radiologiste doit déterminer, comme nous l'avons vu, le nombre de milliampères-minutes, (ma-min) nécessaire pour administrer l'unité de dose qu'il choisit dans des conditions de distance focale, de champ et de filtre définis, et pour son propre appareillage (le voltage étant toujours de 200 KV. max.). Supposons qu'il ait fait cela et que, — c'est ce qui se passe pour les conditions étalons que nous avons adoptées (distance 50 cm., champ 100 cm², filtre 0,5 mm. de cuivre) — il faille 320 milliampères-minutes. (*). Au moyen de plusieurs diagrammes analogues à celui que nous donnons ici, il peut alors calculer aisément les ma-min pour d'autres conditions de traitement. Supposons, par exemple, qu'il veuille effectuer les irradiations dans les conditions suivantes :

(*) C'est le chiffre pour *notre* appareillage et pour *notre* dose érythème.

Distance focale : 75 cm.

Champ : 400 cm²

Filtre : 0,6 mm. de cuivre

et cherchons avec lui quelle doit être la durée du traitement si l'on fait passer dans l'ampoule un courant de 4 milliampères.

Sur le diagramme de la figure 14, établi pour un champ de 400 cm², il mène, à partir du point 75 de l'échelle des distances focales, la ligne p. Du point d'intersection de cette ligne et de la courbe M correspondante au filtre de 0,6 mm. de cuivre, il trace la ligne q qui détermine sur l'échelle des doses relatives, le pourcentage de la radiation à 10cm de profondeur ; soit ici 45,6. Puis de l'intersection de l'autre extrémité de la ligne p et de la courbe N correspondante à 0,6 mm. de cuivre, il mène la ligne r qui coupe l'échelle des doses en profondeur au point 0.21

Puisque : $100 \frac{R_z}{R_s} = 45,6$ et $R_z = 0,21$

$$R_s = 100 \frac{0,21}{45,6} = 0,462$$

Or, les conditions du problème nous disent que pour

$$R_s = I \text{ on a } \text{ma-min.} = 320$$

par conséquent pour $R_s = 0,462$

$$\text{ma-min} = 320 \times \frac{1}{0,462} = 690$$

La durée du traitement doit donc être $\frac{690}{4} = 173$ min.

En pratique, on n'a pas besoin de tracer les droites p, q, r, et la détermination se fait très rapidement.

Il est à remarquer que pour la résolution d'un problème de ce genre, on peut employer divers diagrammes : la seule condition à laquelle ils doivent satisfaire c'est qu'ils aient été établis pour une grandeur de champ identique à celui du problème. La profondeur n'entre pas en ligne de compte puisqu'il ne s'agit là que de doses en surface. Bien que, obtenu par l'intermédiaire de chiffres différents (position différentes des droites q et r), le résultat sera le même pour tous les diagrammes correspondant à un même champ.

Dans la solution du problème ci-dessus, nous avons obtenu, en outre, incidemment, la dose relative qui correspondait aux conditions du problème et à la profondeur indiquée sur le diagramme employé. Naturellement on peut utiliser les diagrammes dans ce but ; mais, en pratique, leur principale utilité réside dans la solution du problème inverse. On part d'une dose déterminée et on cherche les conditions de traitement qui permettront d'appliquer cette dose. A cet égard, le radiologiste peut, par un simple coup d'œil, se faire une idée des possibilités de traitement. Il peut déterminer les conditions les plus économiques et les employer si toutefois elles ne sont pas contre-indiquées par l'expérience biologique et thérapeutique.

Il est peut-être superflu d'ajouter que les limites d'utilisation de ces diagrammes sont les mêmes que pour notre équation. La précision des résultats obtenus par cette méthode graphique est aussi du même ordre.

§ 7 — UN APPAREIL DE MESURE POUR LE DOSAGE EN SURFACE DES RAYONS X

Dans la discussion que nous avons faite des possibilités d'application de notre équation aux irradiations effectuées avec des appareils apparents de celui que nous avons utilisé dans nos expériences, nous avons vu que l'élément d'où provenait l'incertitude était la qualité du rayonnement produit. Pour cette raison, et pour d'autres raisons d'ordre pratique, nous avons pensé à construire un appareil de mesures que l'on pourrait utiliser aisément pour le dosage superficiel. Nous allons indiquer les considérations principales qui nous ont guidés dans la confection de cet appareil.

De nombreuses recherches effectuées par des expérimentateurs divers ont montré que c'est la méthode ionométrique que permet actuellement les meilleures mesures de dosage. Il a été reconnu que si la chambre d'ionisation est construite correctement, on peut faire une corrélation entre l'intensité du courant d'ionisation et l'action biologique (*) du rayonnement, même si sa qualité varie dans certaines limites.

(*) Cela n'a pas été démontré comme étant vrai pour toutes les actions biologiques ; mais nous pouvons en admettre l'exactitude en ce qui concerne l'action sur la peau, que nous prenons seule en considération ici.

Cela nous a conduit à employer les mesures ionométriques et à construire la chambre d'ionisation avec des matériaux organiques.

Pour mesurer le courant d'ionisation, on peut employer divers instruments : tous comportent un organe mobile qui se déplace par rapport à un autre : il faut donc que le courant d'ionisation fournisse l'énergie nécessaire à ce travail. Or, l'énergie d'un faisceau de rayons X est déjà très faible et une petite partie seulement de cette énergie se manifeste par l'ionisation de l'air de la chambre ; il s'en suit que l'énergie disponible pour le fonctionnement de l'instrument de mesures est extrêmement faible (*), et que l'organe mobile doit être très léger et d'un déplacement facile. Il en résulte que de tels instruments sont très délicats, et exigent une manipulation très soignée. Mais le principal inconvénient de ces appareils réside dans ce que, étant très sensibles, ils sont sujets à maintes influences extrinsèques qui peuvent occasionner de grosses erreurs.

Lorsqu'on se sert de chambres d'ionisation très petites, on s'adresse comme appareil de mesures à un électromètre, c'est-à-dire à un appareil électrostatique qui ne mesure pas directement le courant. En général, l'emploi de ces appareils n'est pas indiqué pour les cliniques radiothérapiques, mais ils sont indispensables dans les laboratoires de recherche. On

(**) Il est possible d'amplifier le courant d'ionisation au moyen des lampes à 3 électrodes que l'on utilise en radiotéléphonie. On trouve actuellement sur le marché un appareil de mesures basé sur ce principe, mais ce procédé n'a pas encore atteint un degré de perfectionnement complet.

doit alors abandonner l'idée d'utiliser une petite chambre d'ionisation pour les mesures pratiques de dosage.

Si l'on augmente les dimensions de la chambre, on peut obtenir un courant d'ionisation mesurable par des galvanomètres du type d'Arsonval. Ces instruments s'adaptent mieux à nos besoins parce qu'ils mesurent directement les courants par une déviation de l'organe mobile. On peut trouver des galvanomètres de ce type sensibles à des courants de l'ordre de 10^{-10} ampère. Néanmoins, pour pouvoir utiliser ces instruments, il faut, étant donné l'intensité des faisceaux de rayons X filtrés sur lesquels on peut actuellement opérer, une chambre d'ionisation beaucoup plus grande que celle de Friedrich, par exemple. Il s'en suit que le champ d'utilisation de l'appareil est réduit. On ne pourrait par exemple s'en servir pour faire les expériences que nous avons décrites plus haut. En général une chambre d'ionisation ne se prête à faire semblables mesures que si son volume ne modifie pas sensiblement les conditions du milieu diffusant ou lorsque ses dimensions demeurent petites par rapport aux différences de distances considérées dans les expériences.

Puisque, même en employant les galvanomètres les plus sensibles, la chambre d'ionisation doit être de dimensions relativement grandes, nous avons décidé de ne pas réaliser un appareil permettant le dosage direct.*

(*) DUANE a construit un tel appareil en se servant d'un galvanomètre de la plus haute sensibilité et d'une chambre

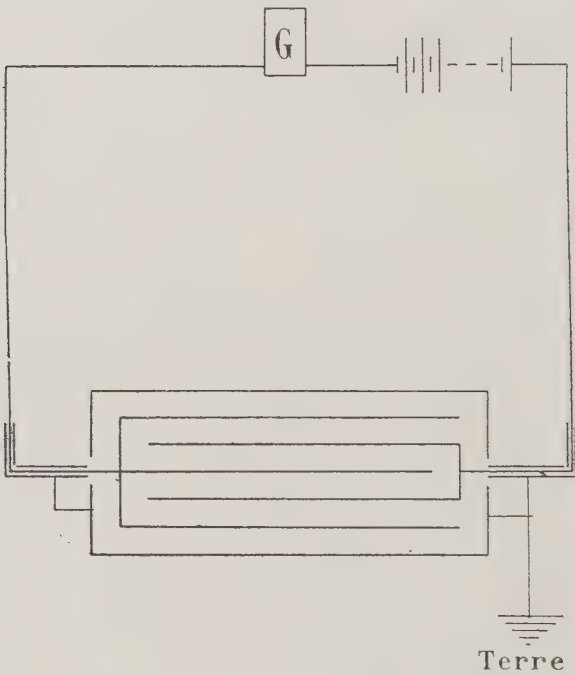
La chambre d'ionisation peut alors être de dimensions considérables parce qu'elle ne sera pas mise sur la peau du patient mais restera toujours dans les mêmes conditions, dans une position fixe par rapport à l'ampoule. Il n'est alors pas nécessaire de faire appel à un galvanomètre de grande sensibilité. Ceci est avantageux parce que, naturellement, les inconvénients qui accompagnent l'emploi du galvanomètre croissent avec leur sensibilité. Nous nous sommes servi d'un galvanomètre de type courant (Leeds et Northrup C° — Type P) très employé dans les laboratoires d'enseignement pour les travaux pratiques des étudiants. Cet instrument n'exige, par conséquent pas, une manipulation minutieuse. Il possède néanmoins une sensibilité qui varie de 10^{-8} à 10^{-9} ampère suivant le bobinage.

L'appareil de mesures que nous nous sommes proposés de réaliser devait servir principalement aux dosages superficiels, avec des rayonnements de qualités variables. Il est nécessaire, dans ces conditions, que l'absorption du rayonnement par la chambre d'ionisation soit peu appréciable en comparaison de l'absorption par les filtres que l'on veut éprouver. Aussi n'avons-nous utilisé pour la construction de nos chambres d'ionisation que de l'aluminium ou des substances organiques.

d'ionisation assez petite. Nous sommes d'avis que cet appareil ne permet pas la détermination des doses en profondeur à cause des dimensions et des caractéristiques de la chambre d'ionisation ; et que pour le dosage superficiel dans les cliniques radiologiques, l'emploi d'un galvanomètre d'extrême sensibilité est contre-indiqué.

Nous avons construit plusieurs chambres dans le but d'arriver à un modèle le plus approprié à nos besoins. Toutes les chambres que nous avons utilisées sont du type général que nous reproduisons dans le schéma de la figure 18.

Fig. 18



Elles comportent 5 ou 3 plateaux ; en outre, deux plateaux extérieurs reliés au sol assurent ce qui est essentiel, la protection électrostatique. Une charpente isolante en bakélite ou en ébonite maintient ces di-

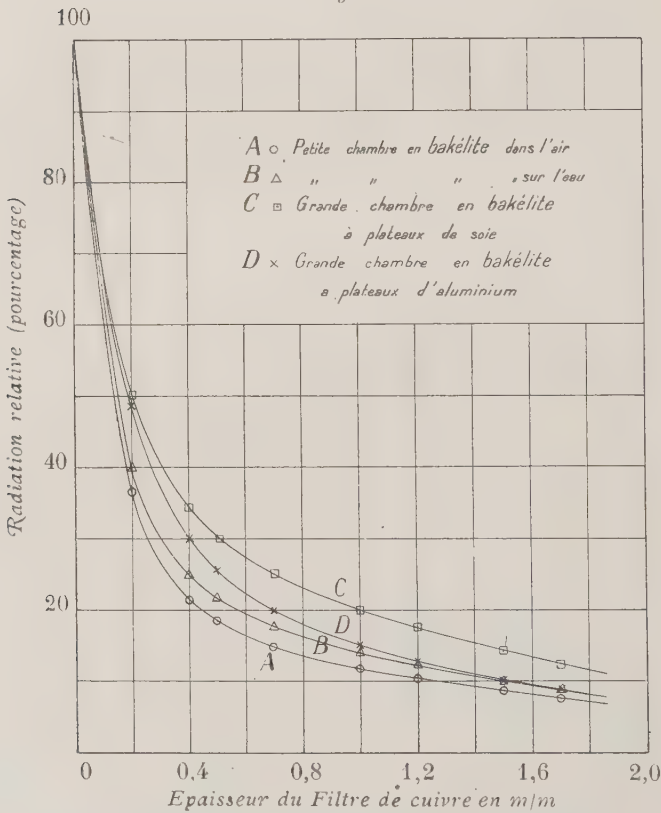
vers plateaux à un centimètre de distance les uns des autres. Deux des chambres utilisées avaient les dimensions suivantes : longueur, 24 cent., largeur, 18 centimètres, profondeur, 6 centimètres. Les plateaux de l'une d'elles étaient en aluminium mince; l'épaisseur totale des plateaux n'atteignant pas un millimètre ; les plateaux de l'autre étaient faits d'un tissu de soie très mince rendu conducteur au moyen d'encre de Chine. Nous avons fait avec ces deux chambres des expériences comparatives sur le rayonnement produit sous la tension de 200 KV max., avec une filtration variable.

Nous avons tout d'abord cherché quel était le voltage nécessaire à l'obtention de la saturation, pour les intensités de rayonnement que nous nous proposons d'employer. Nous avons ainsi trouvé que, dans le cas du rayonnement non filtré, la chambre étant à 40 centimètres de l'anticathode, et l'ampoule étant traversée par un courant de 4 milliampères, une tension de 400 volts environ était nécessaire dans le cas de la chambre à plateau d'aluminium. Une tension inférieure à 300 volts suffisait pour la chambre à plateau de soie, dans les mêmes conditions de travail. Nous devons signaler que la chambre en aluminium (*) produisait toujours un courant beaucoup plus fort que la chambre en soie. Si l'on travaillait sur un rayonnement filtré par 0,5 millimètre de cuivre, au moins, une tension de 150 volts suffisait pour l'une ou l'autre des chambres.

(*) Pour simplifier et pour abréger le langage, nous dirons dorénavant « chambre en aluminium ou en soie », au lieu de « chambre à plateaux d'aluminium, etc. ».

Nous avons ensuite déterminé pour chacune de nos chambres les courbes d'absorption du rayonnement par des épaisseurs croissantes de cuivre (ce sont les courbes C et D de la figure 19. Les inten-

Fig. 19



Comparaison de diverses Chambres d'Ionisation

sités du courant d'ionisation sont, dans les deux cas, mesurés en pourcentage du rayonnement non filtré. La différence des ordonnées des 2 courbes est

TABLEAU XX

Mesures faites avec
des chambres d'ionisation différentes
($\lambda_{\text{eff.}}$ = longueur d'onde « effective »)

A	B	C	D	E	F	G	H	K
FILTRE	RAYON.	$\lambda_{\text{EFF.}}$	RAYON.	$\lambda_{\text{EFF.}}$	RAYON.	$\lambda_{\text{EFF.}}$	RAYON.	$\lambda_{\text{EFF.}}$
mm Cu	TRANS.	u. A.	TRANS.	u. A.	TRANS.	u. A.	TRANS.	u. A.
	PETITE CHAMBRE EN BAKELITE		PET. CH. EN BAKE ¹⁵ SVR. L'EAU		GRANDE CHAMBRE A PLATEAUX de SPIE		GRANDE CHAMBRE A PLATEAUX d'AL	
0	545,0		458,0		329,0		390,0	
0,2	201,0		183,0		176,0		190,0	
0,4	117,0		117,0		114,0		118,0	
0,5	100,0	0,152	100,0	0,156	100,0	0,155	100,0	0,168
0,7	81,4		81,1		82,2		77,3	
0,75	78,7	0,150	77,8	0,150	79,2	0,149	73,3	0,158
1,0	65,2		64,5		66,7		59,7	
1,2	58,1		56,7		58,3		49,6	
1,5	47,8		45,6		46,7		39,5	
1,7	41,6		40,0		41,1		35,0	
1,75	39,3		38,4		40,3		32,7	

caractéristique des 2 chambres employée, et par suite des substances dont sont faits les plateaux. On peut déduire de ce deux courbes que la différence n'est pas aussi marquée pour les rayonnements filtrés par quelques dixièmes de millimètres de cuivre que pour le rayonnement total. Les chiffres des colonnes F et H du tableau XX montrent que, pour un filtre de 1,25 millimètre de cuivre surajouté au filtre initial de 0,5 millimètre, l'écart est de

$$\frac{40,3 - 32,7}{40,3} = 19 \%$$

Pour la radiation non filtrée, il est de 32 %. C'est une différence considérable que l'on ne peut négliger.

Quelle est de ces deux courbes celle pour laquelle le parallélisme avec l'action biologique du rayonnement sur la peau est le meilleur ? Nous n'avons pas de données cliniques directes pour répondre à cette question ; mais nous en possédons indirectement quelques-unes. Nous avons fait, avec la petite chambre d'ionisation décrite au début de ce travail, des mesures relatives pour les rayons gamma du radium et pour le rayonnement X à 200 KV., filtré par 0,5 millimètres de cuivre. Nous avons trouvé dans ce cas un parallélisme satisfaisant entre le résultat des mesures ionométriques et l'action des rayons sur la peau des patient. Etant donné le très grand écart qu'il y a entre les qualités de rayonnements utilisées dans ces expériences, on pourrait penser que l'accord n'est qu'accidentel. Mais les expériences de Friedrich montrent que, pour des rayons X de qualités assez diverses le parallélisme que nous avons constaté existe aussi. Il ne paraît pas injustifié donc de penser que la petite chambre d'ionisation nous fournit une mesure à peu près correcte de la dose érythème, même dans le cas de rayonnements de qualités assez différentes les uns des autres. En conséquence, on peut apprécier dans quelle mesure le parallélisme existe entre les résultats des mesures effectués avec les deux grandes chambres d'ionisation, et les effets biologiques, par la confrontation des mesures faites dans les mêmes conditions avec les trois chambres

d'ionisation (les deux grandes à plateaux et la petite chambre cylindrique).

Les résultats de ces mesures se trouvent dans le tableau XX ; les chiffres de la colonne B ont été obtenus avec la petite chambre d'ionisation dans l'air, tandis que ceux de la colonne D l'ont été avec la même chambre à demi immergée dans l'eau du fantôme. Ces conditions sont celles qui se rapprochent le plus des conditions où se trouve la peau du patient. Dans ce même tableau XX, les colonnes F et H sont relatives aux mesures effectuées respectivement avec la chambre en soie et la chambre en aluminium. Il ressort nettement de la comparaison de ces chiffres que les meilleurs résultats sont fournis par la chambre en soie, et l'on voit en outre, que pour les épaisseurs de filtres, couramment employées en radiothérapie, l'accord entre les valeurs pour telle chambre et celles qui sont fournies par la petite chambre cylindrique, est très bon. Il nous faut maintenant examiner avec soin les conditions qui président à l'emploi de cette chambre d'ionisation en soie, dans les mesures techniques de radiothérapie.

Nous avons d'abord décidé de maintenir la chambre d'ionisation toujours dans la même position par rapport à l'ampoule. Le faisceau de rayonnement que traverse la chambre doit toujours avoir la même grandeur, c'est-à-dire que l'on ne mettra pas les diaphragmes entre la chambre et l'ampoule (*). Le

(*) Si l'on place le diaphragme immédiatement en-dessous de la chambre d'ionisation, il faut faire une correction à cause du rayonnement diffusé par ce diaphragme dans la direction de la chambre.

filtre, lui, sera toujours placé sur la chambre. Dans ces conditions, le galvanomètre n'indiquera que l'intensité du rayonnement émis par l'ampoule, après filtration.

Il est nécessaire aussi d'examiner si l'on peut se fier aux indications du galvanomètre dans la suite des mesures de rayonnement que l'on fera avec le dispositif que nous venons d'indiquer. A priori, étant donné que tous les appareils dont on se sert sont sujets à des erreurs, il vaut mieux définir aussi les autres facteurs de l'émission du rayonnement, c'est-à-dire pour un appareil donné; le voltage et le courant qui traverse l'ampoule, et il est nécessaire, avant de se servir couramment du galvanomètre, de faire pendant plusieurs jours des expériences d'étalonnage. Si l'on trouve que pour une même tension, pour un même filtre, et pour un même courant dans l'ampoule, le galvanomètre indique toujours la même intensité de rayonnement (à très peu près) on pourra se fier aux indications de l'appareil de mesure. Mais même s'il en est ainsi, il est recommandable de faire chaque jour un essai dans les mêmes conditions, et si un désaccord notable est constaté, il faut en rechercher la cause. Nous avons étalonné à plusieurs reprises notre appareil au moyen d'une quantité importante de radium dont on n'utilisait que le rayonnement filtré; en général, nous avons trouvé des résultats concordants. Il nous est cependant arrivé de noter des variations considérables. Nous supposons dans ce qui suit que, à la suite d'étalonnages répétés,

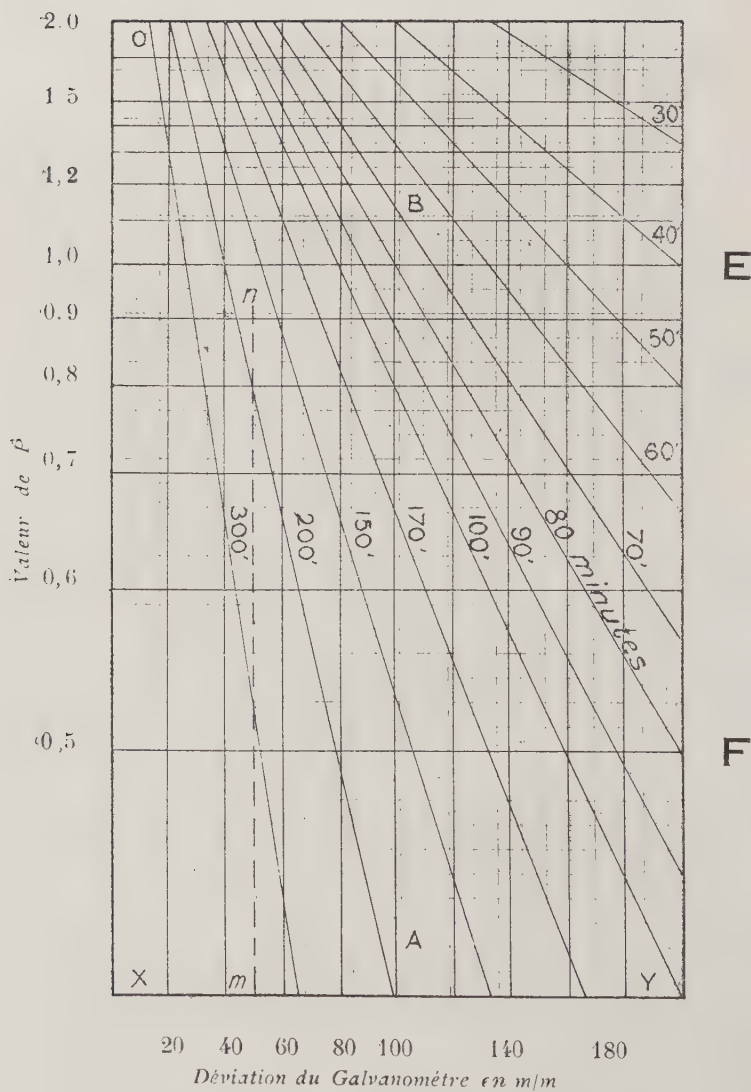
on s'est assuré que l'on peut utiliser l'appareil en toute sécurité pour le dosage.

ETABLISSEMENT D'UNE ECHELLE PERMETTANT DES MESURES PRATIQUES

Supposons que, avec un certain appareillage fonctionnant sous 200 KV. max., 4 milliampères, la filtration étant de 0,5 mm. de cuivre, la déviation lue en régime sur le galvanomètre est de 100 mm., et admettons en outre que dans ces conditions il faut 80 minutes pour administrer l'unité de dose superficielle à une distance focale de 50 cm. et avec un champ de 100 cm. carrés. Si nous changeons le filtre, les autres conditions restant les mêmes, le temps d'irradiation nécessaire pour obtenir la même dose variera en raison inverse de l'indication du galvanomètre. Par exemple, si le filtre additionnel réduit la déviation à 50 millimètres, la durée du traitement devra passer à $\frac{100}{50} \times 80 = 160$ minutes. Nous pouvons alors établir une échelle qui, pour diverses valeurs de filtration, les autres conditions restant les mêmes, nous indiquera directement la durée de l'irradiation. Semblable échelle est reproduite en E sur la figure 20.

Si nous changeons les conditions de traitement autres que la filtration, si par exemple nous changeons la distance focus-peau, nous ne pourrions pas nous servir de la même échelle et il est nécessaire d'en établir une autre semblable. A cet égard, il est important de noter que la filtration exerce sur la durée du traitement une influence qui est indépendante de la distance focus-peau et des dimensions du champ.

Fig. 20



Éclaire variable du Galvanomètre ou Diagramme
pour le calcul des doses en surface

Pourvu que l'on ne modifie que le filtre, le temps d'irradiation varie proportionnellement à l'inverse de la déviation mesurée au galvanomètre, quelle que soit la distance focus-peau et quel que soit le champ. Il suffit donc de connaître la durée nécessaire pour obtenir l'unité de dose superficielle avec un filtre déterminé, mais pour les diverses distances focus-peau et les divers champs utilisés en pratique. Nous pouvons ainsi construire un grand nombre d'échelles fournissant les durées d'irradiation, comme nous venons de l'expliquer.

Nous pouvons faire cela aisément au moyen de l'équation (4) qui, pour les doses superficielles, devient :

$$R_s = \frac{50^2}{x^2} \times b_{xA} \times a_{oA} \times f_{ot}$$

Pour un filtre de 0,5 millimètres de cuivre $f_{ot} = 1$

et alors

$$P = \frac{50^2}{x^2} b_{xA} \times a_{oA} \quad (8)$$

Cette expression permet de calculer la radiation effective à la surface pour diverses distances focus-peau et pour des champs différents, pourvu que le filtre ne change pas (0,5 millimètres de cuivre), ainsi que tous les autres facteurs du traitement. Dans ces conditions, le temps d'irradiation variera en raison inverse de P et pour notre appareillage, il sera

$$T = \frac{80}{P}$$

Si par exemple, $P = 0,5$, la valeur de T sera 160 minutes.

Si maintenant nous voulons établir une échelle à lecture directe, valable pour ces conditions de traitement, il suffit de remarquer que la déviation du galvanomètre doit correspondre, quand on travaille avec un filtre de 0,5 millimètre de cuivre, à 160 minutes. Les subdivisions de cette échelle doivent être proportionnelles aux inverses des déviations du galvanomètre. Dans ces conditions, on lira directement le temps d'irradiation correspondant à la distance focus-peau et au champ utilisés, quelle que soit le filtre (entre les limites habituelles).

On peut de même construire des échelles identiques correspondantes à diverses valeurs de P . Pour simplifier le travail, nous avons établi le diagramme de la figure 20. Il nous fournit la graduation des échelles en unités de temps, pour des valeurs de P allant de 0,4 à 2, ce qui est largement suffisant pour l'emploi pratique. La ligne AB correspond à la déviation du galvanomètre pour les conditions étalon. On voit que cette ligne coupe l'échelle établie pour $P = 1$ au point $T = 80$ minutes. Sur l'échelle établie pour $P = 0,5$ au point correspondant, $T = 160$ (nous retrouvons la valeur que nous avons trouvé précédemment). On peut se servir de ce diagramme de deux manières :

1°) Il constitue une échelle variable pour le galvanomètre permettant la lecture directe du temps d'irradiation. Dans ce but, on le dispose à l'emplacement où se trouve normalement l'échelle du galvanomètre et à une hauteur appropriée pour que le

spot lumineux, réfléchi par le miroir du galvanomètre tombe sur l'échelle correspondante aux conditions de traitement que l'on emploie. On règle, en outre, la position du diagramme, de manière que, lorsque l'ampoule à rayons X ne fonctionne pas, le spot lumineux tombe sur la ligne OX (cette ligne constitue le O de l'échelle). Puis, on lit le temps d'irradiation au point où le spot lumineux coupe l'échelle correspondante à la valeur de P de l'irradiation que l'on effectue.

2°) Cette méthode n'est pas d'un emploi très commode, aussi avons-nous ajouté au diagramme l'échelle XY sur laquelle les déviations du galvanomètre sont marquées en millimètres. A partir de cette lecture en millimètres, le diagramme nous fournit une méthode graphique pour calculer le temps d'irradiation. Par exemple, si la déviation du spot est de 50 millimètres, et si $P = 0.80$, le temps d'irradiation doit être de 200 minutes (intersection de la ligne m-n et de la ligne $P = 0,8$). Il est bon de remarquer ici que le diagramme de la figure 20 n'est valable que pour notre appareillage. La méthode est pourtant applicable quand on emploie un appareil de mesures semblable au nôtre.

Enfin, résumons quelles sont à notre avis les avantages de cet appareil de mesures. Nous avons intentionnellement construit un appareil qui n'est pas universel. Cela nous permettait de mieux adapter sa construction au but que nous nous sommes proposé, et qui était d'avoir un appareil pratique pour la me-

sure des faisceaux de rayons X en radiothérapie profonde. Nous voulions, en outre, qu'il donnât les indications indépendantes de la filtration et autant que possible, parallèles à l'effet biologique du rayonnement sur la peau. L'emploi d'un galvanomètre de sensibilité moyenne qui n'exige pas de manipulations délicates, et d'une chambre d'ionisation à plateaux de soie, nous semble résoudre le problème d'une manière satisfaisante.

RESUME

1. — Nous nous sommes proposé d'étudier la distribution du rayonnement X dans un milieu diffusant, dans le but d'appliquer les résultats au dosage en radiothérapie.

2. — Les parties essentielles de l'appareil de mesures que nous avons construit à cet effet sont établies conformément aux données scientifiques actuelles à ce sujet.

3. — Dans les expériences, nous avons pris toutes les précautions et fait les corrections nécessaires.

4. — Les résultats des expériences ont conduit aux quatre généralisations suivantes :

I) La variation en fonction de la grandeur du champ de la radiation effective à une profondeur donnée quelconque, est la même pour tous les filtres et pour toutes les distances focus-peau employées dans la pratique roentgenthérapie actuelle.

II) La variation en fonction du facteur filtre de la radiation effective à une profondeur quelconque est la même pour tous les champs et pour toutes les distances focus-peau employés en pratique.

III) Si tous les facteurs du dosage, à l'exception de la distance focus-peau, sont les mêmes, le rapport de la dose profonde à la dose superficielle dépend seulement de la loi des carrés des distances.

IV) La loi des carrés des distances permet en radio

thérapie l'évaluation des doses superficielles à des distances diverses du focus, à condition que le faisceau de rayonnement utilisé demeure le même quelle que soit la distance focale considérée.

V) Nous basant sur ces généralisations, nous avons développé une équation empirique pour le dosage en radiothérapie profonde.

VI) Nous présentons une méthode graphique pour la détermination des valeurs du filtre et de la distance focus-peau dans le but de permettre d'administrer une dose de radiation voulue dans le temps le plus court.

VII) Nous précisons les limites d'applicabilité pratique tant des quatre généralisations que de l'équation et du diagramme.

VIII) Enfin nous présentons un appareil de mesures et une méthode convenant pour le dosage en surface.

BIBLIOGRAPHIE

KRCENIG U. FRIEDRICH. — *Physikalische und Biologische Grundlagen der Strahlentherapie.*

WILLIAM DUANE. — *The Scientific Basis of Short Wavelength Therapy.* — American Journal of Roentgenology. Vol. IX. N° 12.

OTTO GLASSER. — *Isodose Charts.* — Am. Journ. of Roent. Vol. X. N° 5.

DESSAUER U. VIERHELLER. — *Die Tiefenwirkung der Roentgenstrahlen.* — Strahlentherapie, Band XII, Heft, 3.

A. W. ERSKINE. — *A Further Study of the Dessauer Charts.* — Radiology, Vol. I. N° 1.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

PREPARATION DE L'EMANATION DU RADIUM

Vu et approuvé :

Paris, le 12 novembre 1923.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,
M. MOLLIARD.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 12 novembre 1923.

LE RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,
P. APPELL

